

电子信息科学与工程类专业规划教材



广东省高等学校本科精品课程

广东省精品开放资源共享课程

# 单片机原理与接口技术

(第2版)

主 编 宋 跃

副主编 石 伟 黄 辉 蒋业文

参 编 任 斌 雷瑞庭 王照平

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书以 80C51 系列单片机为典型机介绍微机基本理论与原理,实现将微机原理的学习和具体的单片机应用实践密切结合。本书从计算机基础知识入手,全面介绍微机的基本组成和原理,重点讲述 80C51 系列单片机的结构、指令系统、程序设计以及常用的接口技术,对 8086 系统和 C51 语言分设两章介绍,一些最新实用的接口技术和接口芯片的使用穿插在相关的章节中介绍。

本书(含习题)以汇编语言为主、C51 为辅来讲述程序的设计方法与技巧,对 Proteus8、 $\mu$ Vision4 软件、C51 语言作基本介绍,其应用与汇编有机穿插在各章教学案例及习题中,C51 与汇编编程在教学案例中交叉出现,对典型或重要知识点案例通常给出汇编语言与 C51 对应的源程序及软件仿真过程。本书选材规范,通俗易懂,每章都配有小结、思考题及习题。

本书可作为高等院校电气与电子信息类专业“微机原理”与“单片机技术”的教材,也可作为高职高专相关专业的教材,同时可作为学习单片机应用基础的培训教材和自学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

单片微机原理与接口技术/宋跃主编. —2 版. —北京:电子工业出版社,2015.8

电子信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-26617-1

I. ①单… II. ①宋… III. ①单片微型计算机—基础理论—高等学校—教材②单片微型计算机—接口技术—高等学校—教材 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 159857 号

责任编辑:凌 毅

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:20 字数:538 千字

版 次:2011 年 7 月第 1 版

2015 年 8 月第 2 版

印 次:2015 年 8 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

# 再 版 前 言

“微机原理及应用”是高等学校电气与电子信息类各专业的计算机硬件基础课程,“单片机与接口技术”是上述各专业的应用技术课程,目前地方院校电子、通信、控制、电气、自动化等专业学生在就业见习时,单片机的设计开发已被企业视为毕业生必备的基本能力。在目前教学时大量压缩的情况下,“微机原理及应用”作为学科基础课程和“单片机与接口技术”作为实践动手要求很高的专业课程,同时分学期前后开设,在学时安排上势必存在一定的困难,由于两门课程存在衔接关系,所以很难保证不在教学内容上出现重复和遗漏。

如何既要让学生学习掌握微机的基本理论和原理,为后续课程(EDA 设计、ARM、嵌入式系统、DSP 等课程以及自主性学习与研究)打下较扎实的理论基础,又要让学生真正掌握单片机的应用技术(包括原理、接口技术、最新设计技术等),以提高学生的实验实践能力、创新创业(就业)能力,这对以培养应用型人才为主的一般院校的本科教学来说极为重要,为此我们试探着编写满足这种要求的教材。本教材第1版经过4年多的教学实践,为更好实现以上目标和服务于应用型大学教学,在听取专家和用户使用意见后,历时一年多修订出版第2版。

本书主要面向教学型、教学研究型的大学教学,旨在将“微机原理及应用”和“单片机与接口技术”两门课程合二为一,在较系统讲述微机基本理论和原理的同时,突出单片机(以80C51为典型机)应用的技术性、实用性、前沿性,以满足本科教学“质量工程”的需要。

本书由东莞理工学院宋跃教授担任主编,湖南工业大学石伟副教授、五邑大学黄辉副教授、佛山科技学院蒋业文副教授任副主编。编写分工如下:宋跃编写第2章、第4章、第7章、8.4.1节,石伟编写第1章、第6章,黄辉编写第9章、第10章,蒋业文编写第8章,东莞理工学院任斌教授编写第3章、第5章,东莞理工学院雷瑞庭老师编写第11章、1.5节、12.4节,黄河科技学院王照平副教授编写第12章,东莞理工学院彭超博士、余炽业高级实验师提供协助。

本书是广东省高等学校本科精品课程和广东省精品开放资源共享课程配套教材,精品课程网址:<http://jpkc.dgut.edu.cn/mcu>。在本书编写过程中,感谢东莞理工学院胡必武副教授、朱德海老师对本书的编写与修改提出的指导和建议。在编写过程中参考了许多文献和资料,在此向各文献资料的作者表示感谢。东莞理工学院本科生黄晓鸿、杨文陶、彭钦发、崔东亮、王磊、谭东洁、曾勇华等承担了全书图文、表格的整理、PPT 设计制作以及程序的仿真与实验等工作,在此向以上各位表示感谢。

本书按照80学时组织编写,具体教学内容可根据实际情况取舍。本书配有电子课件、程序源代码、思考题及习题参考解答、STC 单片机参考资料等,读者可登录华信教育资源网[www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn)下载。

由于作者水平有限,书中肯定存在错误和不足之处,敬请各位同仁不吝批评指正,不胜感谢。

作 者

2015年7月

# 目 录

第 1 章 微机基础知识 .....	1	2.4.2 NOR 和 NAND Flash 存储器的 使用区别 .....	35
1.1 计算机中负数的表示和运算 .....	1	2.4.3 闪存 AT29LV040A 芯片介绍 .....	36
1.1.1 机器数 .....	1	2.5 存储器的组成与扩展 .....	37
1.1.2 机器数的原码、反码和补码 .....	1	2.5.1 存储器芯片的选择 .....	37
1.1.3 补码加减运算 .....	2	2.5.2 存储器的扩展 .....	38
1.1.4 原码乘除运算 .....	3	本章小结 .....	41
1.2 微机中的常用编码 .....	3	思考题及习题 .....	42
1.2.1 ASCII 码 .....	3	第 3 章 80C51 的结构和原理 .....	43
1.2.2 非 ASCII 编码 .....	4	3.1 80C51 系列概述 .....	43
1.2.3 BCD 码 .....	4	3.1.1 MCS-51 系列 .....	43
1.3 微机概述 .....	5	3.1.2 80C51 系列 .....	43
1.3.1 微型计算机的发展 .....	5	3.1.3 80C51 的应用模式 .....	43
1.3.2 微型计算机的基本组成 .....	5	3.2 80C51 典型产品资源配置与引脚 .....	44
1.3.3 微处理器的基本组成 .....	6	3.2.1 80C51 典型产品资源配置 .....	44
1.3.4 微机系统的程序存储与控制 .....	6	3.2.2 引脚信号 .....	45
1.4 单片微型计算机概述 .....	6	3.3 80C51 系列单片机的结构 .....	46
1.4.1 单片机的发展过程及产品 近况 .....	7	3.3.1 80C51 单片机逻辑结构 .....	46
1.4.2 单片机的特点及应用领域 .....	7	3.3.2 80C51 单片机内部结构 .....	46
1.4.3 单片机的供应状态 .....	8	3.4 80C51 内部数据存储器 (内部 RAM) .....	48
1.5 单片机应用的开发仿真工具 .....	9	3.4.1 80C51 的内部数据存储器 .....	48
1.5.1 Keil C51 $\mu$ Vision 集成开发 环境简介 .....	9	3.4.2 专用寄存器的位寻址 .....	53
1.5.2 Proteus Design Suite 软件介绍 .....	15	3.5 80C51 内部程序存储器 (内部 ROM) .....	53
本章小结 .....	23	3.5.1 片内与片外程序存储器的 选择 .....	54
思考题及习题 .....	23	3.5.2 程序存储器的几个特殊单元 .....	55
第 2 章 微型计算机的存储器 .....	24	3.6 80C51 单片机输入/输出 (I/O) 口 .....	55
2.1 微型计算机存储器概述 .....	24	3.6.1 P0 口 .....	55
2.2 只读存储器 .....	26	3.6.2 P1 口 .....	56
2.2.1 只读存储器的结构及分类 .....	26	3.6.3 P2 口 .....	56
2.2.2 只读存储器典型产品举例 .....	29	3.6.4 P3 口 .....	57
2.3 随机存储器 .....	30	3.7 单片机的工作方式 .....	58
2.3.1 静态基本存储电路 .....	32	3.7.1 复位及复位电路 .....	58
2.3.2 动态基本存储电路 .....	33	3.7.2 时钟电路和时序 .....	58
2.3.3 RAM 芯片介绍 .....	33	3.7.3 单片机的低功耗方式 .....	60
2.4 Flash 存储器 .....	34		
2.4.1 Flash 类型及应用 .....	34		



3.8 单片机执行指令的过程 .....	61	4.7.4 位控制转移指令 .....	87
本章小结 .....	62	本章小结 .....	88
思考题及习题 .....	62	思考题及习题 .....	88
<b>第 4 章 80C51 的指令系统</b> .....	<b>64</b>	<b>第 5 章 80C51 的汇编语言程序设计</b> .....	<b>91</b>
4.1 指令的基本格式及常用符号 .....	64	5.1 程序编制的方法和技巧 .....	91
4.1.1 指令的字节数 .....	65	5.1.1 程序编制的步骤 .....	91
4.1.2 指令的执行时间 .....	65	5.1.2 程序编制的方法和技巧 .....	92
4.1.3 汇编语言的语句结构 .....	65	5.1.3 汇编语言的语句种类及 指令格式 .....	92
4.2 80C51 的寻址方式 .....	66	5.2 源程序的编辑和汇编 .....	94
4.2.1 立即寻址 .....	66	5.3 汇编语言程序设计和基本程序结构 .....	95
4.2.2 直接寻址 .....	66	5.3.1 顺序程序设计 .....	95
4.2.3 寄存器寻址 .....	67	5.3.2 分支程序 .....	95
4.2.4 寄存器间接寻址 .....	67	5.3.3 循环程序 .....	99
4.2.5 变址寻址 .....	68	5.3.4 子程序及其调用 .....	100
4.2.6 相对寻址 .....	68	5.4 常用程序举例 .....	105
4.2.7 位寻址 .....	69	5.4.1 算术运算程序 .....	105
4.3 数据传送类指令 .....	70	5.4.2 代码转换 .....	106
4.3.1 一般传送指令 .....	70	5.4.3 I/O 操作 .....	108
4.3.2 特殊传送指令 .....	72	5.5 简单 I/O 设备的并口直接驱动示例 .....	109
4.4 算术运算类指令 .....	74	本章小结 .....	111
4.4.1 不带进位加法指令及 BCD 码 加法调整指令 .....	75	思考题及习题 .....	112
4.4.2 带进位加法指令 .....	77	<b>第 6 章 51 单片机的 C 语言程序设计</b> .....	<b>113</b>
4.4.3 加 1 指令 .....	77	6.1 单片机 C 语言概述 .....	113
4.4.4 带借位减法指令 .....	77	6.1.1 C51 的程序结构 .....	113
4.4.5 减 1 指令 .....	78	6.1.2 C51 编译器介绍 .....	113
4.4.6 乘、除法指令 .....	78	6.1.3 C51 语言和汇编语言的关系 .....	113
4.5 逻辑运算类指令 .....	78	6.2 C51 的数据类型 .....	114
4.5.1 逻辑与指令 .....	79	6.2.1 C51 的数据类型 .....	114
4.5.2 逻辑或指令 .....	79	6.2.2 C51 数据的存储类型 .....	115
4.5.3 逻辑异或指令 .....	80	6.2.3 8051 单片机特殊功能寄存 器的 C51 定义 .....	116
4.5.4 累加器清零及取反指令 .....	80	6.3 C51 的运算符和表达式 .....	116
4.5.5 移位指令 .....	80	6.3.1 赋值运算符 .....	116
4.6 控制转移类指令 .....	81	6.3.2 算术运算符 .....	117
4.6.1 无条件转移指令 .....	82	6.3.3 关系运算符 .....	117
4.6.2 条件转移指令 .....	83	6.3.4 逻辑运算符 .....	118
4.6.3 调用及返回指令 .....	84	6.3.5 位运算符 .....	118
4.7 布尔变量操作指令 .....	85	6.3.6 其他运算符 .....	118
4.7.1 位传送指令 .....	86	6.4 C51 流程控制语句 .....	121
4.7.2 位置位指令 .....	86	6.4.1 条件语句 .....	121
4.7.3 位运算指令 .....	87		

6.4.2	循环语句	122	8.4.1	I <sup>2</sup> C 总线接口及其扩展	184
6.4.3	开关语句	123	8.4.2	SPI 总线接口及其扩展	193
6.4.4	break、continue 和 goto 语句	123	8.4.3	CAN 总线	196
6.5	C51 的构造数据类型	124	8.4.4	USB 总线	197
6.5.1	数组	124	8.4.5	单总线 (1-Wire)	198
6.5.2	指针	125	本章小结		199
6.5.3	结构	127	习题及思考题		199
6.5.4	枚举	128	<b>第 9 章 80C51 单片机的系统扩展</b>		201
6.6	C51 的函数	128	9.1	I/O 接口电路概述	201
6.6.1	C51 函数定义	129	9.2	I/O 传送方式	201
6.6.2	C51 函数调用	130	9.2.1	无条件传送方式	201
6.6.3	混合编程简介	130	9.2.2	查询传送方式	202
6.6.4	混合编程形式	132	9.2.3	中断传送方式	202
6.6.5	C51 库函数	133	9.2.4	直接存储器 (DMA) 存取方式	202
6.7	C51 中断编程实例	133	9.3	存储器扩展及时序	202
6.8	C51 实例仿真介绍	134	9.3.1	系统扩展总线及扩展芯片的寻址方式	203
6.8.1	C51 仿真实例	134	9.3.2	程序存储器扩展	203
6.8.2	混合编程实例	135	9.3.3	数据存储器扩展	206
本章小结		136	9.3.4	简单 I/O 口扩展	208
思考题及习题		137	9.4	可编程 I/O 扩展接口芯片 81C55 及其应用	210
<b>第 7 章 80C51 的中断系统及定时/计数器</b>		138	9.5	可编程并行接口芯片 82C55 及其应用	214
7.1	中断概述	138	9.6	单片机显示、键盘系统	219
7.2	中断处理过程	139	9.6.1	LED 数码管显示接口	219
7.3	80C51 的中断系统及其控制	141	9.6.2	LCD 液晶显示接口	226
7.4	80C51 中断源的扩展	147	9.6.3	键盘接口	232
7.5	80C51 的定时/计数器及其应用	148	本章小结		237
本章小结		164	思考题及习题		237
<b>第 8 章 80C51 单片机的串行口及串行总线扩展</b>		166	<b>第 10 章 80C51 单片机的模拟量接口</b>		239
8.1	串行通信基本知识	166	10.1	并行 D/A 转换器与单片机的接口	239
8.1.1	基本通信方式及特点	166	10.1.1	D/A 转换原理	239
8.1.2	串行通信的数据传送方式	166	10.1.2	DAC 主要性能指标	240
8.1.3	串行通信的分类	167	10.1.3	8 位 D/A 转换器 DAC0832 及与单片机接口	241
8.1.4	串行通信的波特率、比特率	168	10.1.4	12 位 D/A 转换器 DAC1208 及与单片机接口	244
8.2	80C51 单片机的串行口	168	10.2	并行 A/D 转换器与单片机的接口	246
8.2.1	MCS-51 单片机串行口的结构	168	10.2.1	A/D 转换的技术指标	246
8.2.2	MCS-51 单片机串行口控制	169	10.2.2	A/D 转换原理	247
8.3	80C51 单片机的串行口应用	175			
8.4	单片机的串行总线扩展	184			

10.2.3	8 位 A/D 转换器 ADC0809 及 与单片机接口 .....	247	本章小结 .....	277
10.2.4	12 位 A/D 转换器 AD1674 及 与单片机接口 .....	251	思考题及习题 .....	277
10.3	串行 A/D 转换器与单片机的接口 .....	253	<b>第 12 章 微处理器及微机系统</b> .....	278
10.3.1	串行 A/D 转换器 HX711 介绍 .....	254	12.1 微处理器概述 .....	278
10.3.2	工作原理 .....	255	12.1.1 微处理器发展简介 .....	278
10.3.3	80C51 和 HX711 的接口设计 .....	256	12.1.2 微处理器的结构 .....	278
	本章小结 .....	257	12.1.3 8086 的内部寄存器结构 .....	279
	思考题及习题 .....	257	12.1.4 8086 存储空间管理 .....	280
<b>第 11 章 80C51 应用系统设计方法</b> .....		259	12.1.5 8086 的引脚功能 .....	282
11.1 单片机应用设计过程 .....		259	12.1.6 8086 的两种工作模式 .....	283
11.1.1 确定系统的功能与性能 .....		259	12.1.7 8086 的总线周期 .....	284
11.1.2 确定系统基本结构 .....		259	12.1.8 8086 的指令系统 .....	285
11.1.3 单片机应用系统硬件、软件的 设计原则 .....		260	12.1.9 汇编语言程序设计 .....	287
11.1.4 硬件设计 .....		261	12.2 微处理器系统构成与扩展 .....	290
11.1.5 软件设计 .....		262	12.2.1 微型计算机系统的构成 .....	290
11.1.6 资源分配 .....		262	12.2.2 8086 系统扩展 .....	291
11.1.7 单片机应用系统的开发 .....		262	12.3 总线技术 .....	296
11.2 提高系统可靠性的一般方法 .....		263	12.3.1 总线概述 .....	296
11.2.1 电源干扰及其抑制 .....		264	12.3.2 总线规范及主要性能指标 .....	296
11.2.2 地线干扰及其抑制 .....		264	12.3.3 常用的系统总线 .....	296
11.2.3 其他提高系统可靠性的 方法 .....		265	12.4 计算机发展现状 .....	297
11.3 设计与制作实例 .....		270	12.4.1 台式计算机及其接口 .....	297
11.3.1 单片机兴趣实验板设计与 制作 .....		270	12.4.2 便携式计算机 .....	302
11.3.2 用 DS18B20 温度传感器进行 温度测量 .....		272	12.4.3 超级计算机 .....	303
11.3.3 电子密码锁设计 .....		273	本章小结 .....	304
			思考题及习题 .....	305
			<b>附录 A 89C51 单片机指令按序排列表</b> .....	306
			<b>附录 B MCS-51 汇编指令-机器码 对照表</b> .....	309
			<b>参考文献</b> .....	311

# 第 1 章 微机基础知识

## 1.1 计算机中负数的表示和运算

### 1.1.1 机器数

在计算机中用 0 和 1 表示的数统称为机器数，机器数通常用二进制形式表示。机器数有 3 个基本特征。

#### (1) 机器数的真值

机器数的数值称为机器数的真值，真值一般用十进制数表示，即用正、负符号加绝对值来表示的实际数值，如+10，-30 等。

#### (2) 机器数的符号

实际数据有正数和负数之分，由于计算机内部硬件只能表示两种物理状态（0 和 1），因此，实际数据的符号在机器里就用二进制数的最高位表示，通常以 0 代表符号“+”，以 1 代表符号“-”。

#### (3) 机器数的字长

机器设备一次能表示的二进制位数叫机器数的字长，一台机器数的字长是固定的。通常 8 位二进制数称为 1 字节（Byte），目前机器数字长一般都是字节的整数倍，如字长 8 位、16 位、32 位、64 位。

机器数根据小数点位置固定与否可以分为定点数和浮点数。通常使用定点数表示整数，用浮点数表示实数。

**定点整数：**整数可以分为无符号整数和有符号整数两类。无符号整数的所有二进制位全部用来表示数值的大小；有符号整数用最高位表示数的符号，剩余位表示数值的大小。

**浮点实数：**任意一个实数  $N$  都可以写成  $N=2^P*S$  的形式，其中  $P$  称为阶码，俗称指数， $S$  为尾数。因为同一个数可以写成很多种形式，因此，浮点数必须按照某一个标准写成规范化的形式，现在普遍采用的浮点数格式是 IEEE 标准。IEEE 标准对于单精度浮点数采用 4 字节表示，其中数符占 1 位，阶码占 8 位，尾数占 23 位。如图 1.1 所示。

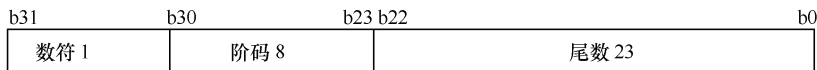


图 1.1 IEEE 浮点数格式

### 1.1.2 机器数的原码、反码和补码

#### 1. 原码

将机器数真值形式中的最高位用“0”表示“+”号，用“1”表示“-”号，这种数码形式叫做原码。当  $X$  为正数时， $[X]_{\text{原}}=X$ 。当  $X$  为负数时，将  $|X|$  数值部分绝对值前面的符号位上写成“1”即可。如：

$$X1=69 \quad [X1]_{\text{原}}=01000101$$

$$X2=-69 \quad [X2]_{\text{原}}=11000101$$

原码表示法比较直观，其数值部分就是该数的绝对值，而且与真值、十进制数的转换十分

方便。但是用原码进行加减运算时，因符号位不能与数值部分一起参加运算，而必须利用单独的线路确定符号位，造成运算电路变得很复杂，由此提出了反码和补码的概念。

## 2. 反码

如果是正数，其反码和原码的形式相同；如果是负数，其反码为原码的数值部分按位取反，符号位保持不变。如：

$$X1=69 \quad [X1]_{\text{反}}=01000101$$

$$X2=-69 \quad [X2]_{\text{反}}=10111010$$

在反码中，数值 0 有两种形式，对于 8 位数来说：

$$[+0]_{\text{反}}=00000000 \quad [-0]_{\text{反}}=11111111$$

## 3. 补码

补码是根据补数的概念引入的，假定现在的时间为 6 点整，而手表却是 8 点整。手表校准的方法有两种，一种是倒拨 2 小时，可以理解为减法运算（-2），一种是正拨 10 小时，可以理解为加法运算（+10），那么对校准手表来讲，减 2 与加 10 是等价的，也就是说，减 2 可以用加 10 来实现。这是因为 8 加 10 等于 18，然而手表最大只能表示 12，当大于 12 时进位自然丢失，18 减去 12 就只剩 6 了。这说明减法在一定条件下，是可以用来代替的。在以上例程中“12”称为“模”，“+10”称为“-2”对模 12 的补数。

假设 X 为 n 位二进制数，则其模为  $2^n$ ，因此 X 的补码可表示为

$$[X]_{\text{补}}=2^n+X$$

对于二进制数的补码求解可分为正数和负数分别讨论。

当  $X=+x_{n-2}x_{n-3}\cdots x_1x_0$  时，有

$$[X]_{\text{补}}=2^n+X=0x_{n-2}x_{n-3}\cdots x_1x_0$$

所以正数的补码和原码的形式相同。

当  $X=-x_{n-2}x_{n-3}\cdots x_1x_0$  时，有

$$\begin{aligned} [X]_{\text{补}} &= 2^n + X = 2^n - x_{n-2}x_{n-3}\cdots x_1x_0 \\ &= 2^{n-1} + 2^{n-1} - x_{n-2}x_{n-3}\cdots x_1x_0 \\ &= 2^{n-1} + (2^{n-1} - 1) - x_{n-2}x_{n-3}\cdots x_1x_0 + 1 \\ &= 2^{n-1} + (11\cdots 1 - x_{n-2}x_{n-3}\cdots x_1x_0) + 1 \\ &= 2^{n-1} + \overline{x_{n-2}}\overline{x_{n-3}}\cdots\overline{x_1}\overline{x_0} + 1 \\ &= (\overline{0}\overline{x_{n-2}}\overline{x_{n-3}}\cdots\overline{x_1}\overline{x_0}) + 1 \end{aligned}$$

所以负数的补码等于它的绝对值（符号位除外）按位取反后加 1。如：

$$X1=69 \quad [X1]_{\text{补}}=01000101$$

$$X2=-69 \quad [X2]_{\text{补}}=1\overline{1}\overline{0}\overline{0}\overline{0}\overline{0}\overline{1}\overline{0}+1=10111010+1=10111011$$

### 1.1.3 补码加减运算

在微机加减运算中一般都以补码的形式进行，因为补码运算不需要进行符号判别，符号位和数值部分一并参与运算，当然运算结果也是以补码的形式出现的。

补码加减运算法则：两数和的补码等于两数的补码和；两数差的补码等于两数的补码差。

$$[X+Y]_{\text{补}}=2^n+[X+Y]=[2^n+X]+[2^n+Y]=[X]_{\text{补}}+[Y]_{\text{补}}$$

$[X-Y]_{补}=2^n+[X-Y]=[2^n+X]-[2^n+Y]=[X]_{补}-[Y]_{补}$

【例 1.1】已知  $X=+1101$ ， $Y=+0110$ ，用补码计算  $Z=X-Y$ 。

解

方法 1:  $[X]_{补}=01101$ ， $[Y]_{补}=00110$ ，则 $[Z]_{补}=[X]_{补}-[Y]_{补}=01101-00110=00111$ 。

方法 2:  $[X]_{补}=01101$ ， $[-Y]_{补}=11010$ ，则 $[Z]_{补}=[X]_{补}+[-Y]_{补}=01101+11010=00111$ 。

显然，两种方法的计算结果完全一致，所以利用补码可以将减法运算转换成加法运算，从而彻底解决了符号位问题。

补码的加减运算要注意以下几个问题。

- ① 补码运算时，其符号位与数值部分一起参加运算。
- ② 补码的符号位相加后，如果有进位出现，要把这个进位舍去（自然丢失）。
- ③ 用补码运算，其运算结果亦为补码。在转换为真值时，若符号位为 0，数位不变；若符号位为 1，应将结果求补才是其真值。

1.1.4 原码乘除运算

计算机中的乘除运算一般都是通过原码来实现的，在运算过程中要分别确定运算结果的符号和数值。计算机一般不按照通常的乘除运算来实现，因为这样对硬件的要求太高，所以通常采用移位的方式实现。具体法则是：左移（右移） $n$  位，相当于乘（除）以  $2^n$ 。

1.2 微机中的常用编码

在计算机应用中，经常要用二进制代码表示各种字符和符号，同时也要将二进制数表示成与现实生活相适应的十进制数，所有这些都与计算机的编码有关，下面介绍几种常见的编码类型。

1.2.1 ASCII 码

计算机系统中除了数字 0~9 之外，还经常要用到字母、标点符号以及其他如空格、换行等控制符号。20 世纪 60 年代，美国制定了一套字符编码，对以上列举的常用字符用二进制数做了统一编码规定，这种编码的全称为美国信息交换标准代码，简称 ASCII 码。后来国际标准化组织（ISO）和国际电报电话委员会以它为基础制定了相应的国际标准，目前计算机系统都采用 ASCII 码。

ASCII 码是一种 7 位代码，共有 128 个编码。具体编码如表 1.1 所示。

表 1.1 ASCII 码字符表

b6b5b4 b3b2b1b0		000	001	010	011	100	101	110	111
		0	1	2	3	4	5	6	7
0000	0	NUL	DLE	SP	0	@	P	、	p
0001	1	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
0010	2	STX	DC2	“	2	B	R	b	r
0011	3	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
0100	4	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
0101	5	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u

(续表)

b6b5b4 b3b2b1b0		000	001	010	011	100	101	110	111
		0	1	2	3	4	5	6	7
0110	6	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
0111	7	BEL	ETB	‘	7	G	W	g	w
1000	8	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1001	9	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1010	A	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1011	B	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
1100	C	FF	FSP	,	<	L	\	l	
1101	D	CR	GSP	-	=	M	]	m	}
1110	E	SO	RSP	.	>	N	^	n	~
1111	F	SI	USP	/	?	O	_	o	DEL

在计算机的存储单元中，1 个 ASCII 码值占 1 字节（8 位），其最高位（b7）用作奇偶校验位。

### 1.2.2 非 ASCII 编码

英语用 128 个符号编码就够了，但是用来表示其他语言时 128 个符号是不够的。我国于 1980 年制定了信息交换 7 位编码字符集，即国家标准 GB1988-80，除了用人民币符号¥代替美元符号\$外，其余代码与 ASCII 码相同。当然除了国家标准 GB1988-80 外，我国还编写了简体中文常见的编码方式表 GB2312，使用两个字节表示一个汉字，所以理论上最多可以表示  $256 \times 256 = 65536$  个符号。

### 1.2.3 BCD 码

BCD 码是用 4 位二进制码来表示十进制数中的 0~9 这 10 个数码，英语全称为 Binary-Coded Decimal，简称 BCD 码。BCD 码有很多种形式，如 8421 码、余 3 码、5421 码和 2421 码等，其中 8421 码应用最为广泛，它们的对应关系如表 1.2 所示。

表 1.2 BCD 码对应表

十进制数	8421 码	余 3 码	5421 码	2421 码
0	0000	0011	0000	0000
1	0001	0100	0001	0001
2	0010	0101	0010	0010
3	0011	0110	0011	0011
4	0100	0111	0100	0100
5	0101	1000	1000	0101
6	0110	1001	1001	0110
7	0111	1010	1010	0111
8	1000	1011	1011	1110
9	1001	1100	1100	1111

## 1.3 微机概述

### 1.3.1 微型计算机的发展

计算机 (Computer) 又称电脑, 是 20 世纪最重要的科技成果。电子计算机通常可分为巨型机、大型机、中型机、小型机、微型机 5 类。其中微型机具有体积小、重量轻、结构灵活、价格低廉且应用广泛等特点。自从 1946 年第一台计数机 ENIAC 问世到今天, 微型机的发展可以分为以下 5 个阶段。

第一阶段 (1971—1973): (之前为电子计算机) 这一阶段典型的微型机以 Intel 4004 和 Intel 4040 为基础。微处理器和存储器采用 PMOS 工艺, 工作速度很慢。

第二阶段 (1974—1977): 以 8 位微处理器为基础, 典型的微处理器有 Intel 8080/8085、Zilog 公司的 Z80 及 Motorola 公司的 6800。

第三阶段 (1978—1981): 以 16 位和准 32 位微处理器为基础, 如 Intel 公司的 8086、Motorola 的 68000 和 Zilog 的 Z8000。

第四阶段 (20 世纪 80 年代): 20 世纪 80 年代初, IBM 公司推出开放式的 IBM PC, 这是微型机发展史上的一个重要里程碑。IBM PC 采用 Intel 80X86 (当时为 8086/8088、80286、80386) 微处理器和 Microsoft 公司的 DOS 操作系统与总线设计方法。

第五阶段 (20 世纪 90 年代开始): RISC (精简指令集计算机) 技术的问世使微型机的体系结构迈向了嵌入式的发展道路, 目前 ARM、Power PC、68000、MIPS、SC-400 等处理器已经在高端电子产品中占据了主导地位。

### 1.3.2 微型计算机的基本组成

微型计算机由 CPU、存储器、输入/输出接口电路和系统总线构成, 具体方框图如图 1.2 所示。

CPU: CPU 俗称中央处理器, 是微型计算机的心脏, 其性能直接决定了整个微型机的各项性能指标。

存储器: 包括随机存取存储器 (RAM) 和只读存储器 (ROM), 其中 ROM 用来长期存储程序代码, RAM 用来暂时保存程序代码和运行所需数据。

I/O 接口电路: 用来使外部设备和微型机相连。

系统总线: 总线是连接多个功能部件或多个装置的一组公共信号线, 为 CPU 和其他部件之间传输数据、地址和控制信息提供传输通道。按所传送信息类型, 总线可以分为数据总线 DB (Data Bus)、地址总线 AB (Address Bus) 和控制总线 CB (Control Bus) 3 种类型。

地址总线 AB: 是微型计算机用来传送地址信息的信号线。地址总线是单向、三态总线。

数据总线 DB: 是 CPU 用来传送数据信息的信号线。数据总线的位数和处理器的位数相对应。数据总线是双向、三态总线。

控制总线 CB: 是用来传送控制信号的一组总线。控制总线的信号线可为单向或双向, 也可三态或非三态, 取决于具体的信号线。

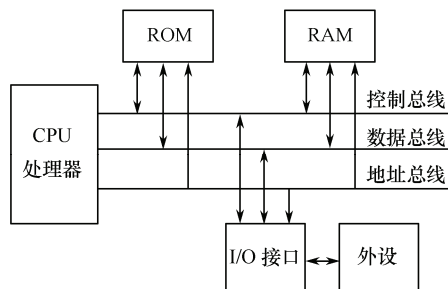


图 1.2 微机计算机系统结构图



微型计算机系统是在微型计算机的基础上，配上必要的外设（如键盘、光驱等）、电源以及必要的软件而构成的系统。

### 1.3.3 微处理器的基本组成

微处理器是微型计算机的核心，是控制器和运算器的合称。不同的 CPU，其内部结构、硬件设置都不尽相同，但基本部件基本相同。

#### 1. 算术逻辑单元 ALU

算术逻辑单元（ALU）是中央处理器 CPU 的一部分，用以处理计算机指令集中的算术与逻辑操作。在某些处理器中将 ALU 分为两部分，即算术单元（AU）与逻辑单元（LU）。

#### 2. 累加器 ACC

累加器 ACC 是一个寄存器，是 CPU 中工作最繁忙的寄存器。许多指令的操作数取自 ACC，许多运算中间结果也存放于 ACC。ACC 中的数据还可以根据需要进行左右移位，使用非常灵活。

#### 3. 标志寄存器 FR

标志寄存器是所有处理器的一个重要部件。它是用来存放运算结果特征的，以便于判断 CPU 的运行状态。不同的处理器的标志寄存器的位定义不尽相同。

#### 4. 程序计数器 PC

程序计数器是用于存放下一条指令地址的地方，通常又称为指令计数器。在程序开始执行前，必须将要运行程序的起始地址送入 PC，当执行指令时，CPU 将自动修改 PC 的内容。

#### 5. 指令寄存器 IR

指令寄存器 IR 是用来保存当前正在执行的一条指令。当执行一条指令时，先把它从内存取到数据寄存器（DR）中，然后再传送至指令寄存器 IR 保存，供 CPU 分析并发出相应的控制信号。

### 1.3.4 微机系统的程序存储与控制

计算机之所以能在没有人直接干预的情况下能自动地完成各种信息处理任务，是因为人们事先为它编制了各种工作程序，计算机的工作过程实质就是程序执行过程。

#### 1. 程序存储

程序是由一条条指令组合而成的，而指令是以二进制代码的形式出现的，把执行一项信息处理任务的程序代码，以字节为单位，按顺序存放在存储器的一段连续的存储区域内，这就是程序存储概念。

#### 2. 程序控制

计算机工作时，CPU 中的控制器部分，按照设计的程序到存储器中取出指令代码，在 CPU 中完成对代码的分析，然后由 CPU 的控制器部分适时地向各个部件发出完成该指令功能的所有控制信号，这就是程序控制的概念。

## 1.4 单片微型计算机概述

单片微型计算机作为微机家族中的一员，自 1976 年问世以来，以其极高的性价比越来越受到人们的重视和关注。目前单片机已成功地应用在智能仪表、机电设备、过程控制、数据处理、自动检测和家用电器等各个领域方面。

### 1.4.1 单片机的发展过程及产品近况

什么叫单片机？单片机就是在一块硅片上集成了 CPU、RAM、ROM、定时/计数器和多种 I/O 口（如并行、串行及 A/D 变换器等）的一个完整的微机处理系统。

单片机可分为通用型和专用型两大类，通常所说的和本书所介绍的单片机是指通用型单片机。通用型单片机是把可开发资源（如 ROM、RAM、I/O 口等）全部提供给使用者，如 51 系列、AVR 系列等单片机。专用型单片机也叫专用微控制器，如频率合成调谐器、打印机控制器等。

#### 1. 单片机的发展过程

随着单片机的迅速发展，其品种日益增多。纵观单片机的发展过程，大致可以分为 3 个阶段。

##### （1）单片机形成阶段

1976 年 Intel 公司推出了 MCS-48 系列单片机。其片内结构有：8 位 CPU、1KB ROM、64B RAM、27 根 I/O 线和 1 个 8 位定时/计数器，2 个中断源。

##### （2）单片机性能完善提高阶段

1980 年 Intel 公司推出了 MCS-51 系列单片机，其片内结构有：8 位 CPU、4KB ROM、128B RAM、4 个 8 位并口、1 个全双工串行口、2 个 16 位定时/计数器，5 个中断源，其寻址范围 64KB，并有控制功能较强的布尔处理器。

##### （3）微控制器化阶段

1982 年 Intel 推出 MCS-96 系列单片机。芯片内集成：16 位 CPU、8KB ROM、232B RAM、5 个 8 位并口、1 个全双工串行口、2 个 16 位定时/计数器。寻址范围 64KB。片上还有 8 路 10 位 ADC、1 路 PWM 输出及高速 I/O 部件等。

#### 2. 单片机的产品近况

20 世纪 80 年代以来，单片机发展极其迅速。就通用单片机而言，世界上一些著名的计算机厂家已投放的产品就有几十个系列，数百个品种。许多公司以 MCS-51 的内核为基础，推出了各种衍生品种。目前世界上较为著名的单片机的生产厂家和主要机型见表 1.3。

表 1.3 单片机生产厂家和主要机型

生产厂家	单片机型号
美国 Intel 公司	MCS-51 系列、MCS-96 系列
荷兰 Philips 公司	80C552 系列
台湾华邦公司	W78C51 高速低价系列
Maxim 公司	DS89C420 系列
Cygnal 公司	C8051F 高速 SOC 系列
ADI 公司	ADuC8**高精度 ADC 系列
美国 Atmel 公司	AT89 系列、AVR 系列
Microchip 公司	PIC 系列
TI 公司	16 位低功耗 MSP430 系列
深圳宏晶公司	STC 系列（增强型 8051 内核）

尽管单片机品种很多，但在我国使用最多的还是 Intel 公司的 51 系列单片机及其增强型、扩展型等衍生机型。51 系列单片机产品繁多，主流地位已经形成，所以本书将以 80C51 为对象讲述单片机的原理和接口技术。

### 1.4.2 单片机的特点及应用领域

#### 1. 单片机的特点

单片机问世以来的发展与微处理器不同。微处理器沿着高速运算、大规模数据分析与处理

能力、大规模存储容量等方向发展，以提高通用计算机的性能，其接口界面也是为了满足外设和网络接口而设计的。单片机则是从工业测控对象、环境、接口特点出发，向着增强控制功能、提高工业环境下的可靠性、灵活性等方向发展。因此，单片机有着自己的特点。

① 品种多样，型号繁多。品种型号逐年扩充以适应各种需要，使系统开发者有很大的选择自由。CPU 从 4、8、16、32 到 64 位，有些还采用 RISC 技术。

② 存储容量大。目前片内 RAM 发展到 2KB、4KB，TI 公司的 CC2538 甚至达到了 32KB；片内 ROM 发展到 512KB，一般的程序都可以不用外接存储器。而且存储技术也发生了很大的变化，从 EPROM、E<sup>2</sup>PROM、Flash，到如今的 FRAM（铁电技术），新存储器技术的应用使电路设计更简单、方便。

③ 频率高，速度快。目前单片机的总线工作速度已达数百万条指令每秒，工作频率达到 50MHz 甚至更高，指令执行周期减到数十微秒。

④ 控制功能强，集成度高。现今的单片机不仅含有 CPU、RAM、ROM 存储器和 I/O 接口，还有 A/D、PWM、UART、定时/计数器、DMA、看门狗监视器、串行接口、传感器、驱动器等，可以说单片机已经构成了一个完整的功能强大的计算机应用系统。

⑤ 功耗低。目前的单片机生产工艺已经完成了 CMOS 化，并逐步向 HCMOS 过渡。芯片供电电压从 5V 降到 3V、2V 甚至 1V 左右，工作电流从 mA 级降到  $\mu$ A 级。

⑥ 配套应用软件多。众多的配套软件提供了强大的软件库，使用单片机应用系统开发更快速、方便。

⑦ 易扩展。片内具有计算机正常运行所必需的部件，芯片外部有许多供扩展用的总线及并行、串行输入/输出引脚，很容易构成各种规模的计算机应用系统。

## 2. 单片机的应用领域

由于单片机有良好的控制性能，所以结合不同类型的传感器，可实现对电压、电流、功率、频率、湿度、温度、角度、长度和压力等物理量的测量。近年来，单片机在智能仪器仪表、机电一体化产品、实时工业控制、计算机网络和通信、家用电器以及交通领域中的汽车、火车、飞机、航天器等各个领域取得了广泛的应用。

通用单片机由于结构简单、价格便宜、使用方便，因而易于推广。但也有一定的局限性，这表现在资源利用率较低，且体积较大，抗干扰能力差，在恶劣的工作环境中还是 PLC 的天下。

### 1.4.3 单片机的供应状态

#### 1. 片内无 ROM 状态

单片机内部没有程序存储器。使用这种单片机时，必须在外部配置程序存储器，典型芯片为 8031，这是目前使用最广泛的一种单片机形式。

#### 2. 片内有 ROM 状态

单片机内带有掩模 ROM 的典型芯片为 MCS-51 中的 8051。掩模 ROM 必须由厂家才能写入固定的程序，用户自己一般是不能写入的，使用方式通常是用户将调试好的应用程序交由厂家固化到片内 ROM 中，故这种单片机只是在用于大批量生产的产品中才会使用。

#### 3. 片内有 EPROM 状态

单片机内带有片内 EPROM，典型芯片为 MCS-51 系列的 8751。EPROM 是用户自己可以改写的只读存储器，但存储空间一般都有限，通常是在开发的程序量不大时才使用，而且这种单片机的价格比较高。

#### 4. 一次性可编程 ROM

一次性可编程 ROM (OTP)，也称现场可编程 ROM (PROM)，Microchip 公司的 PIC 系列芯片就是典型应用。这种 ROM 的内容可以由用户写入，但只能写入一次，容量可以从 512B 到 32KB 不等。

#### 5. 片内 Flash 存储器配置

单片机内带 Flash，典型芯片为 Atmel 公司的 89C51 系列。Flash 存储器是一种可擦除、可改写的 ROM，具有编程速度快，容量大，可以反复改写，且价格比片内 EPROM 的单片机便宜的优点。


#### 6. 铁电存储技术 FRAM

FRAM 技术是利用铁电晶体的铁电效应实现数据存储的，这是近期最新的存储技术。因为 FRAM 技术保持数据不需要电压，也不需要像 DRAM 一样周期性刷新，所以 FRAM 的特点是速度极快，功耗极低，擦除次数高，TI 公司的 MSP430FR57xx 系列是首款采用该技术的单片机。

### 1.5 单片机应用的开发仿真工具

#### 1.5.1 Keil C51 $\mu$ Vision 集成开发环境简介

Keil  $\mu$ Vision IDE 是德国 Keil 公司开发的基于 Windows 平台的嵌入式集成开发环境，包含一个高效的编译器、项目管理器和一个 MAKE 工具。Keil  $\mu$ Vision IDE 包括一系列工具，支持 ARM<sup>®</sup>，Cortex<sup>™</sup>-M，Cortex-R，8051，C166 和 251 处理器，其中 Keil C51 是一种专门为 8051 单片机设计的高效率 C 语言编译器，符合 ANSI 标准，生成的程序代码运行速度极高，所需要的存储器空间极小，完全可以与汇编语言媲美。

Keil  $\mu$ Vision4 集成开发环境总体上可分为程序编辑、编译用户界面和程序调试界面。程序编辑、编译用户界面如图 1.3 所示。Keil  $\mu$ Vision4 启动界面即为程序编辑、编译用户界面，在此用户可进行汇编语言源程序或 C51 源程序的输入、编辑与编译。选择菜单命令 Debug→START/STOP Debug Session 或单击工具栏的  图标，进入程序调试界面。

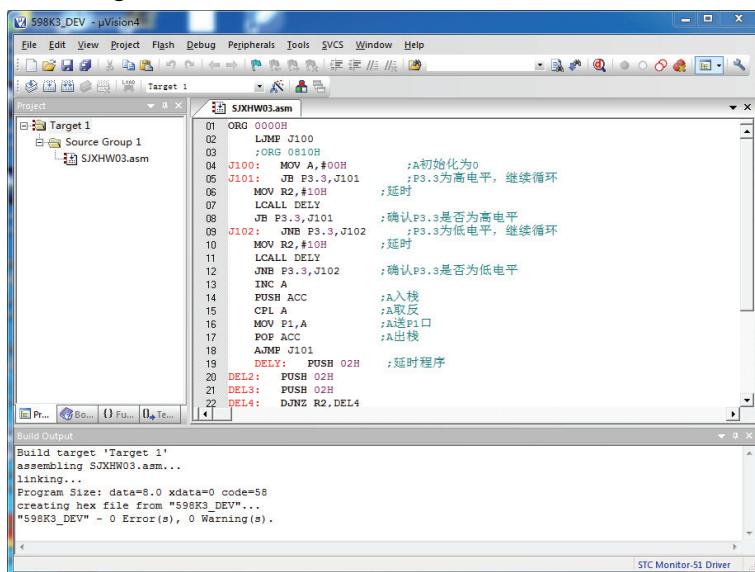



图 1.3  $\mu$ Vision4 程序编辑、编译用户界面

图 1.4 所示为程序调试界面，在此环境下可实现单步、跟踪、断点与全速运行方式调试，并可打开寄存器窗口、存储器窗口、I/O 并行端口窗口、定时/计数器窗口、中断窗口、串行窗口以及自定义变量窗口进行控制与监控。再次单击工具栏的  图标，返回程序编辑、编译用户界面。

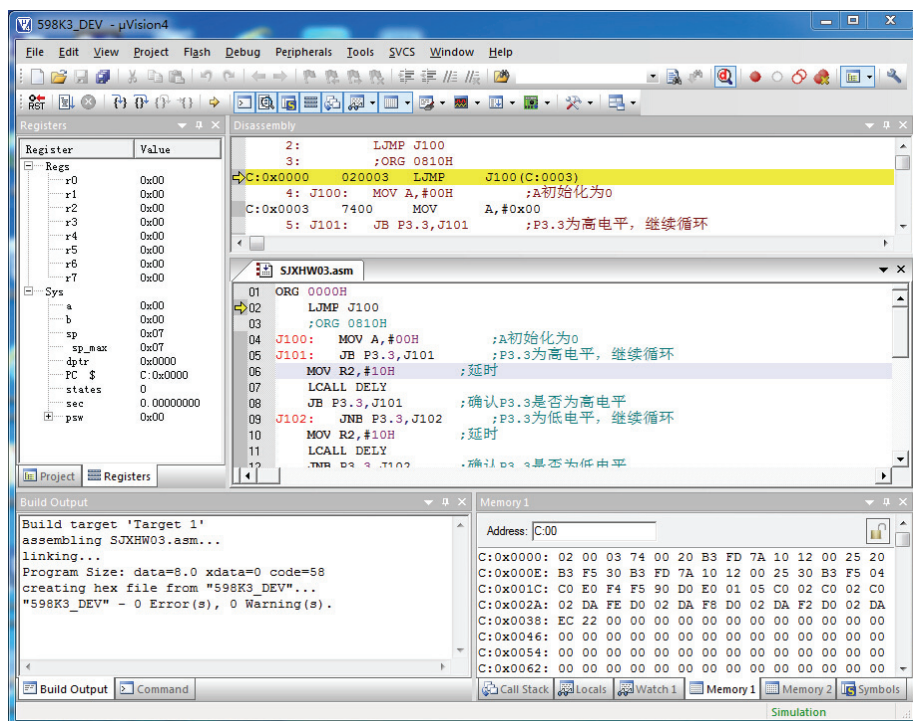


图 1.4 μVision4 程序调试界面

在 Keil μVision4 集成开发环境中使用工程项目的文件方法来管理文件，而不是单一文件的模式。所有的文件包括头文件和源程序（汇编语言源程序、C51 语言源程序），甚至说明性的技术文档都可以放在工程项目文件里统一管理。例如，在 D 盘，新建一个工程项目文件夹，名为：Plout。Keil μVision4 集成开发环境的开发流程如下：

创建项目→新建、输入、编辑应用程序→把程序文件添加到项目中→编译与连接、生成机器代码文件→仿真调试程序。

### 1. 建立项目工程

Keil C51 μVision4 包括一个项目管理器，它可以使 80x51 应用系统的设计变得简单。要创建一个应用，需要按下列步骤进行操作：

(1) 启动 μVision4，新建一个项目文件并从器件库中选择一个器件。单击 **Project→New μVision Project** 选项，在弹出的窗口（见图 1.5）中输入准备建立的工程文件名，其后缀名系统会自动添加为\*.uvproj。

(2) 接着系统会要求选择单片机芯片型号。Keil C51 μVision 几乎支持所有 51 内核的单片机，设计者可以根据使用的单片机型号来选择，如图 1.6 所示。

(3) 单击图 1.6 中的“OK”按钮，程序会询问是否将标准 51 初始化程序（STARTUP.A51）添加到项目中，如图 1.7 所示。单击“是”按钮，程序会自动添加标准 51 初始化程序到项目中并将其复制到项目所在文件夹中，一般情况下单击“否”按钮不添加。

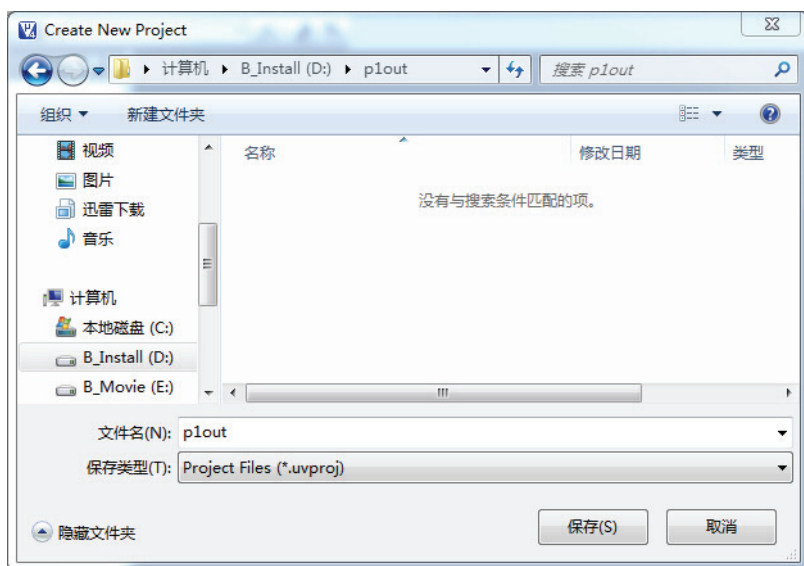


图 1.5 Create New Project 对话框

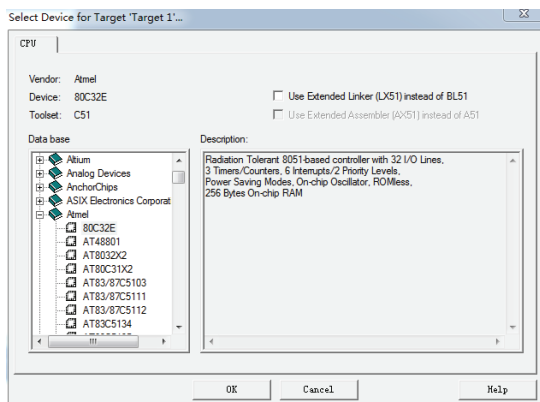


图 1.6 Select Device for Target 对话框

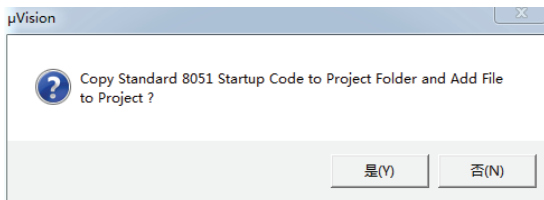


图 1.7 添加标准 51 初始化程序确认框

创建一个新工程后，在左侧的工程管理窗口就会自动生成一个默认的目标（Target1）和文件组(Source Group1)，如前面的图 1.3 所示。

（4）用文本编辑器编写源文件。选择菜单命令File→New，弹出程序编辑工作区，输入源程序代码清单，如图 1.8 所示，并以文件名 p1out.asm 进行保存（选择菜单命令 File→Save As），如图 1.9 所示。特别注意，保存时要加上扩展名。源文件可以是汇编语言源文件、C 语言源文件、库文件等。不过不同类型的源文件的扩展名不同，C 语言程序文件扩展名为\*.c，汇编语言源文件扩展名为\*.asm，头文件为\*.h。

（5）添加源文件到项目中。如图 1.10 所示，在项目管理窗口中选中文件组“Source Group1”并右击，在弹出的快捷菜单中选择“Add Files to Group Source Group1”选项，通过“文件类型”下拉菜单切换文件类型，单击“Add”按钮就可将选中的文件（可选多个）添加到项目工程中，或者双击也可以达到同样的效果，单击“Close”按钮关闭添加文件对话框，如图 1.11 所示。添加所有必要的文件后，就可在项目程序组目录下看到并进行管理，选中文件双击即可在编辑窗口中打开该文件。

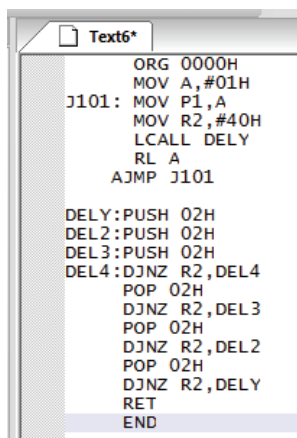


图 1.8 在编辑工作区中输入程序

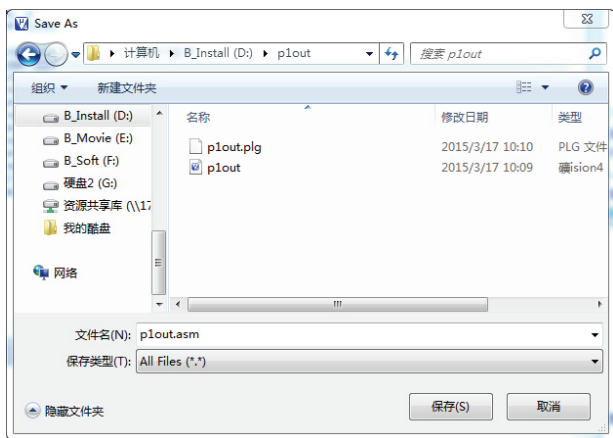


图 1.9 以 plout.asm 为文件名保存

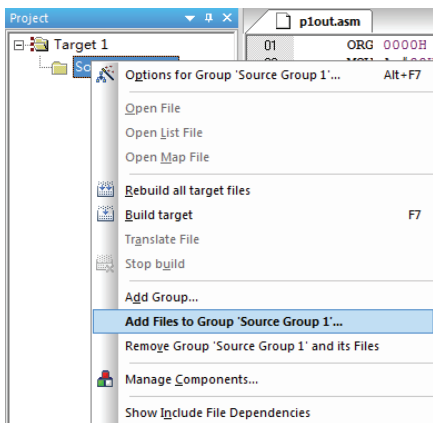


图 1.10 添加文件到项目的快捷菜单

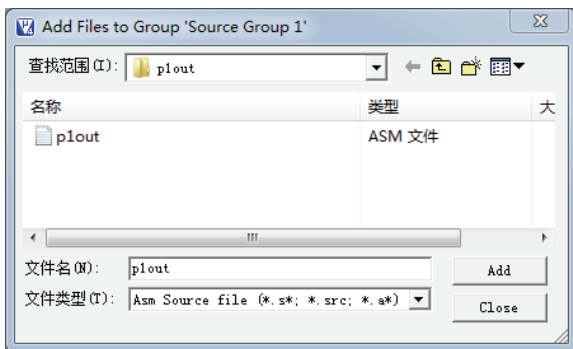






图 1.11 添加文件到项目对话框

## 2. 编译与连接项目文件

项目文件创建完成后，就可以对项目文件进行编译、连接、创建目标文件（机器代码文件.HEX），但在编译前要根据目标的硬件配置环境先进行目标配置。

（1）环境配置。选择菜单命令 **Project→Options for Target** 或在工具栏里单击  图标，打开“Options for Target‘Target 1’”对话框，如图 1.12 所示。在该对话框设定目标的硬件环境，有多个选项卡，用于选择设备（Device）、目标属性、输出属性、C51 编译器属性、A51 编辑器属性、BL51 连接属性、调试属性等信息的设置。一般情况下按默认设置即可，但有一项目是必须设置的，即设置在编译、连接程序时自动生成机器代码文件(.HEX)，默认文件名为项目文件名。

单击“Output”选项卡，弹出“Output”设置对话框，如图 1.13 所示，勾选“Create HEX File”选项，并可在“Name of Executable”信息框中输入机器代码文件的文件名，单击“OK”按钮结束设置。

（2）编译与连接。选择菜单命令 **Project→Build target(Rebuild target files)**或单击编译工具栏相应的编译按钮   ，启动编译、连接程序。编译、连接后，在输出窗口中将输出编译、连接信息。信息最后一行，如提示 0 Error(s)，则表示编译成功；否则提示错误类型和错误语句所在位置。双击错误信息光标将出现程序错误行，可进行程序修改，修改后必须重新编译，直到提示 0 Error(s)为止。



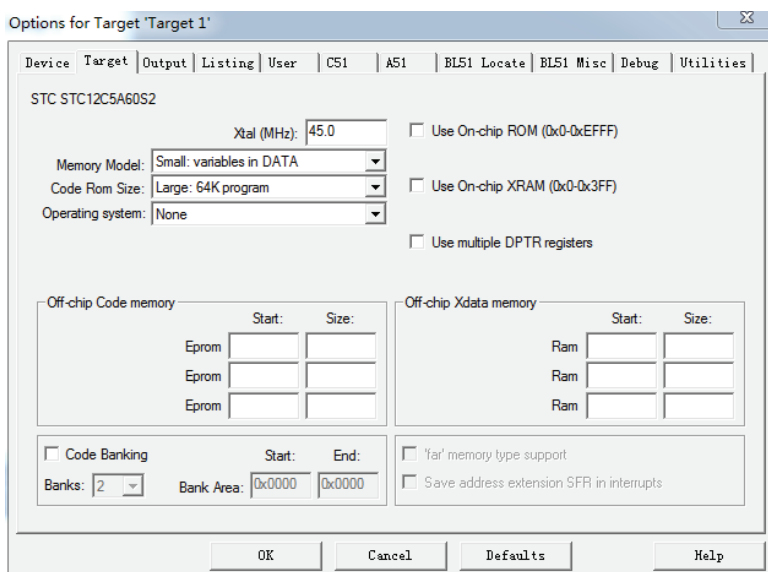


图 1.12 编译设置界面

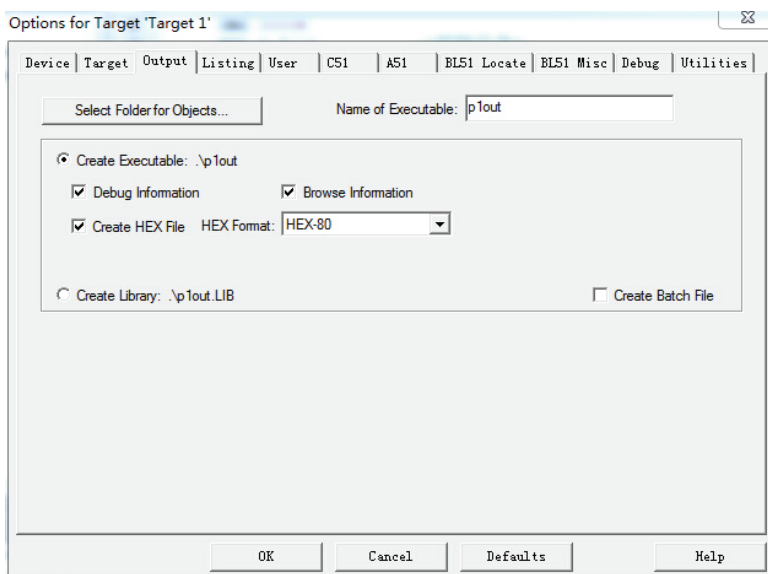



图 1.13 Output 选项卡

### 3. 仿真调试

在仿真调试前，一般要先设置调试属性，在“Options for Target ‘Target 1’”对话框中，单击“Debug”选项卡，如图 1.14 所示，勾选左边的“Use Simulator”选项，表示使用 Keil  $\mu$ Vision4 的软件仿真，勾选右边的“Use”选项，则需有相应的硬件支持。

选择菜单命令 Debug→Start/Stop Debug Session 或单击工具栏的  图标进入调试模式，Keil  $\mu$ Vision4 的调试模式界面能显示仿真调试的各种窗口，如左侧的寄存器(Registers)窗口、中间的 Disassembly 窗口、源程序显示窗口、命令 Command 窗口及 Memory/Watch 等各种参数的观察窗口，还可以通过菜单 Peripherals 调出设备的资源窗口，如图 1.15 所示。

① 选择菜单命令 Peripherals→I/O-Ports→Port 1，调出 P1 显示控制窗口。



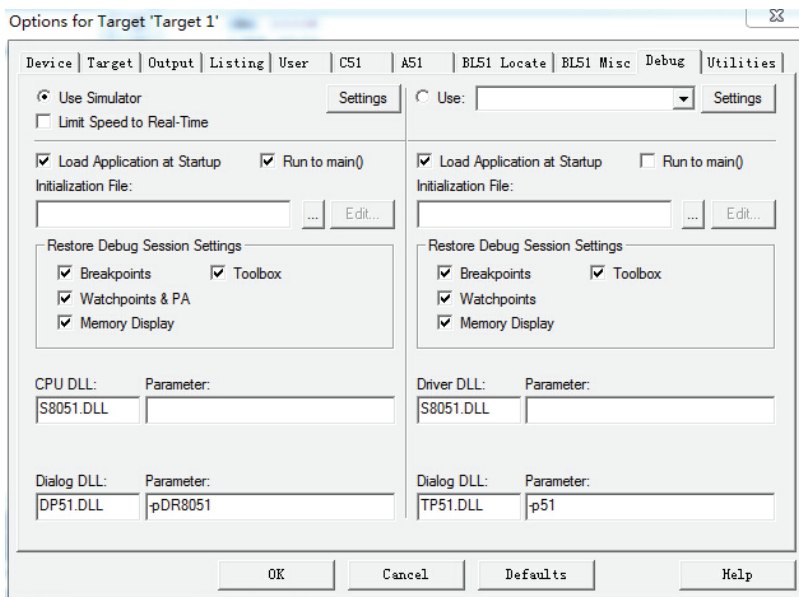


图 1.14 Debug 选项卡设置

② 选择菜单命令 **Debug→Run** (F5 键)，全速运行程序，P1 显示控制窗口应该可以看到一个“√”循环移动，通过观察 P1 窗口的状态（“√”表示位状态输出为高电平，为空白表示输出为低电平）或查看左侧显示的状态值，来判断程序功能的正确性。

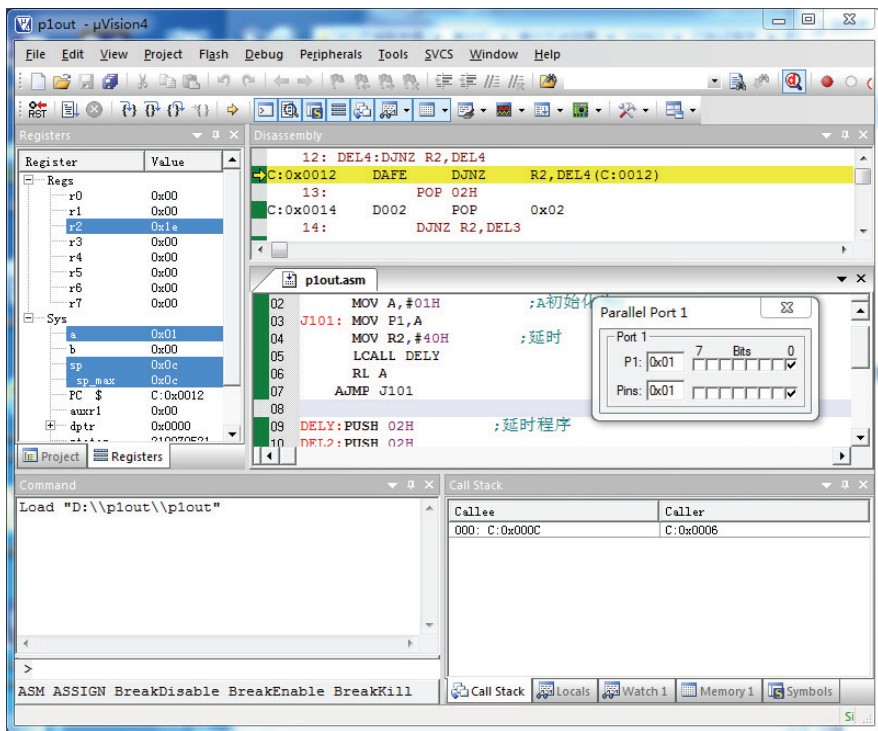



图 1.15 Keil uVision4 的调试用户界面


③ 除了全速运行外，**Debug** 菜单还有跟踪运行 (F11 键)、单步运行 (F10 键)、执行到光标处和断点运行等，也可通过单击工具栏的调试按钮  来实现相应的功能。

跟踪运行/Step: 用于精确调试指令或观察指令运行状态。每按动一次跟踪运行/Step (F11 键) 按钮, 系统执行一条指令, 若执行调用子程序, 会进入子程序中单步执行每一条指令。

单步运行/Step Over: 用于单步调试指令或观察指令运行状态。每按动一次单步运行/Step Over (F10 键) 按钮, 系统执行一条指令, 若执行调用子程序, 也是把整个子程序作为一条指令一次性完成。

执行到光标处: 用于分段调试程序或观察程序运行状态。可通过光标设置程序的执行目标处, 按动该按钮时, 从 PC 当前处开始执行, 直至光标处。

断点运行: 也是用于分段调试程序或观察程序运行状态。将光标移动到某一条程序指令处用断点设置功能按钮设置断点, 可设置多个断点。按动全速运行或单步运行等按钮时, 程序从 PC 当前处开始执行, 遇到断点即停止; 再次按运行菜单又开始接着执行程序, 遇到下一个断点又会停止。

④ 再次单击工具栏的  图标, 返回程序编辑、编译用户界面。

## 1.5.2 Proteus Design Suite 软件介绍

Proteus Design Suite 是英国 Labcenter 公司开发的电路及单片机系统设计与仿真软件。Proteus 可以实现数字电路、模拟电路及微控制器系统与外设的混合电路系统的电路仿真、软件仿真、系统协同仿真和 PCB 设计等功能。Proteus 是目前唯一能对多种微处理器进行实时仿真、调试与测试的 EDA 工具, 真正实现了在没有实际硬件时就可对系统进行调试、测试和验证, 极大地提高了产品的设计开发效率, 降低了开发风险。由于 Proteus 软件逼真的协同仿真功能, 特别适合作为配合单片机课堂教学和实验的学习工具, 使得单片机的学习和应用研究开发过程变得容易和简单。

Proteus 软件提供了近 40 个元器件库、近万种元器件。元器件涉及电阻、电容、二极管、三极管、变压器、继电器、各种放大器、各种激励源、各种微控制器、各种门电路、各种终端等。Proteus 软件中还提供交直流电压表、逻辑分析仪、示波器、定时/计数器和信号发生器等虚拟测试信号工具, 同时也支持虚拟终端、I<sup>2</sup>C 总线、SPI 总线等总线协议的仿真调试。

Proteus 主要由两个设计平台组成:

① Schematic Capture/ISIS (Intelligent Schematic Input System) ——原理图设计与仿真平台, 用于电路原理图的设计及交互式仿真;


② PCB Layout /ARES (Advanced Routing and Editing Software) ——高级布线和编辑软件平台, 用于印制电路板的设计, 并产生光绘输出文件。

### 1. ISIS 原理图介绍

#### (1) 进入 Proteus ISIS

双击桌面上的 Proteus 8 Professional 图标或单击开始→程序→Proteus 8 Professional 菜单, 出现如图 1.16 所示界面, 表明进入 Proteus 8 集成开发环境。Proteus 8 主要包括主界面、原理图绘制用户界面、PCB Layout 界面。

#### (2) 原理图工作界面

这里主要介绍原理图绘制用户界面, 单击工具栏的  isis 图标, 即可打开原理图绘制用户界面。Proteus 8 ISIS 的工作界面是一种标准的 Windows 界面, 如图 1.17 所示。包括标题栏、主菜单栏、标准工具栏、绘图工具栏、状态栏、对象选择按钮、预览对象方位控制按钮、仿真进程控制按钮、预览窗口、对象选择器窗口、图形编辑窗口。

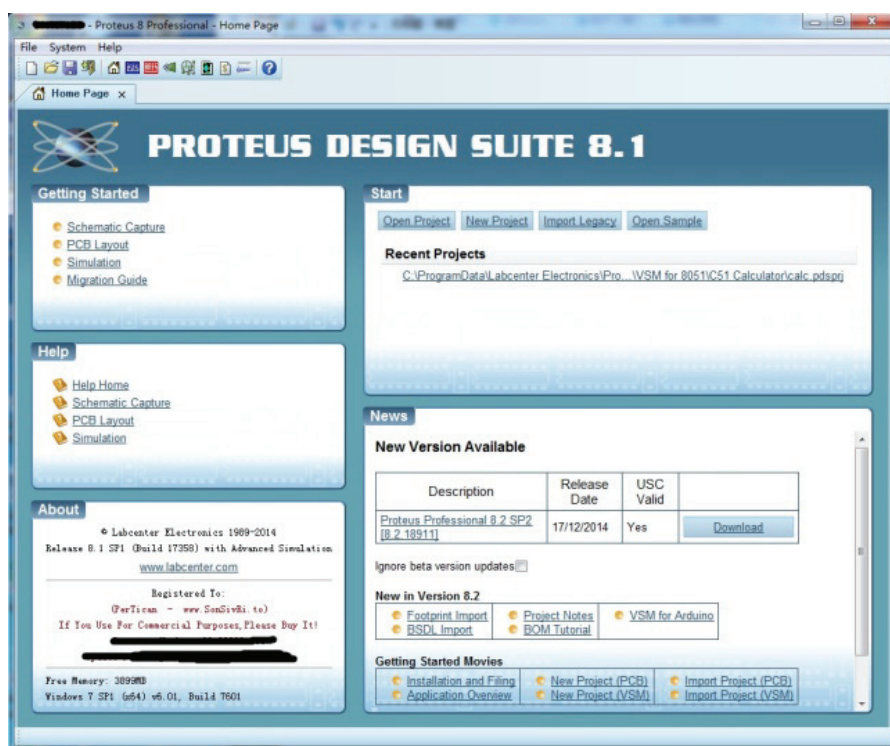


图 1.16 Proteus 8 主界面

快捷工具栏分为主工具栏和元器件工具栏。主工具栏包括文件工具、视图工具、编辑工具、设计工具 4 个部分，每个工具栏都提供若干快捷按钮。

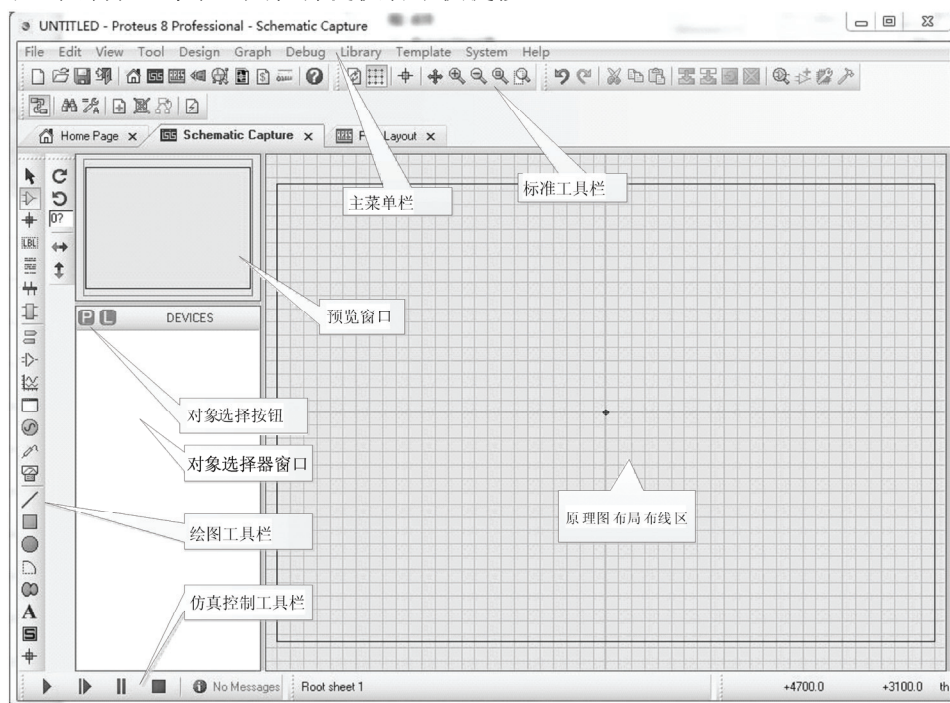


图 1.17 Proteus 8 ISIS 工作界面

“主工具栏”按钮栏如图 1.18 所示, 从左到右按钮功能依次为: 新建文件; 打开文件; 保存文件; 关闭工程; 返回主页; 打开 ISIS 原理图界面; 打开 PCB Layout 界面; 打开 3D 视图; 打开设计管理器; 打开 BOM 表; 打开源程序编辑窗口; 帮助。



图 1.18 “主工具栏”按钮栏

“视图工具”按钮栏如图 1.19 所示, 从左到右按钮功能依次为: 刷新; 网格开关; 原点; 选择显示中心; 放大; 缩小; 全图显示; 区域缩放。



图 1.19 “视图工具”按钮栏

“编辑工具”按钮栏如图 1.20 所示, 从左到右按钮功能依次为: 撤销; 重做; 剪切; 粘贴; 复制选中对象; 移动选中对象; 旋转选中对象; 删除选中对象; 从器件库选元器件; 制作器件; 封装; 释放元件。



图 1.20 “编辑工具”按钮栏

“设计工具”按钮栏如图 1.21 所示, 从左到右各按钮功能依次为: 自动布线; 查找; 属性分配工具; 新建图纸; 删除图纸; 退到上层图纸; 生成电气规则检查报告。



图 1.21 “设计工具”按钮栏

“元器件工具”栏包括方式选择、配件模型、图形绘制 3 个部分, 每个工具提供若干快捷按钮。

“方式选择”按钮栏如图 1.22 所示, 从左到右各按钮功能依次为: 选择即时编辑元件; 选择放置元件; 放置节点; 放置网络标号; 放置文本; 绘制总线; 放置子电路图。



图 1.22 “方式选择”按钮栏

“配件模型”按钮栏如图 1.23 所示, 从左到右各按钮功能依次为: 端点方式; 器件引脚方式; 仿真图表; 录音机; 信号发生器; 电压探针; 电流探针; 虚拟仪表。

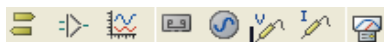


图 1.23 “配件模型”按钮栏

“图形绘制”按钮栏如图 1.24 所示, 从左到右各按钮功能依次为: 绘制直线; 绘制方框; 绘制圆; 绘制圆弧; 绘制多边形; 编辑文本; 绘制符号; 绘制原点。



图 1.24 “图形绘制”按钮

“元器件方向选择”按钮栏如图 1.25 所示, 从左到右各按钮功能依次为: 向右旋转 90°; 向左旋转 90°; 水平翻转; 垂直翻转。



图 1.25 “元器件方向选择”按钮栏

“仿真工具”按钮栏如图 1.26 所示, 从左到右各按钮功能依次为: 全速运行; 单步运行; 暂停; 停止。



图 1.26 “仿真工具”按钮栏



## 2. Proteus 仿真介绍

Proteus 有交互式仿真和基于图表的仿真两种不同的仿真方式, 其中交互式仿真用以检验用户所设计的电路是否能正常工作, 而基于图表的仿真则主要用来研究电路的工作状态和细节检测。


Proteus 中的整个电路分析是在 ISIS 原理图设计模块下延续下来的, 仿真时原理图中通常会包含线路上的探针、电路激励源、虚拟仪器和曲线图表等仿真部件, 下面就具体介绍各仿真部件。



### (1) 探针


探针主要用来测量电路仿真时各点的电压和电流的值。单击绘图工具栏下的 (电压探针) 和 图标 (电流探针), 就可以将探针调用出来进行仿真。探针既可用于基于图表的仿真, 也可用于交互式仿真中。探针有电压探针 (Voltage probes) 和电流探针 (Current probes) 两种。其中电压探针可在模拟仿真中使用, 也可在数字仿真中使用。在模拟电路中记录真实的电压值, 而在数字电路中, 则记录逻辑电平及其强度。电流探针只可在模拟电路中使用, 并可显示电流方向。

### (2) 激励源

激励源是电路工作时的一些输入信号, 利用特定的输入信号能测试设计电路的功能和性能。单击绘图工具栏下的 图标 (Generator mode), 就可以选择各种激励源, 常用的激励源主要有以下几种。


DC:	直流电压源
Sine:	幅值、频率、相位可控的正弦波发生器
Pulse:	幅值、周期和上升/下降沿时间可控的模拟脉冲发生器
Exp:	指数脉冲发生器
SFFM:	单频率调频波信号发生器
Pwlin:	任意分段线性脉冲、信号发生器
File:	File 信号发生器, 数据来源于 ASCII 文件
Audio:	音频信号发生器
DState:	稳态逻辑电平发生器
DEdge:	单边沿信号发生器
DPulse:	单周期数字脉冲发生器
DClock:	数字时钟信号发生器
DPattern:	模式信号发生器

### (3) 虚拟仪器

虚拟仪器是用来完成信号测量和观察的虚拟设备, 单击绘图工具栏下的 图标 (Virtual instruments mode), 就可以选择各种虚拟仪器。常用的虚拟仪器主要有以下几种。

OSCILLOSCOPE:	虚拟示波器
LOGIC ANALYSER:	逻辑分析仪
COUNTER TIMER:	定时/计数器
VIRTUAL TERMINAL:	虚拟终端
SPI DEBUGGER:	SPI 调试器
I2C DEBUGGER:	I <sup>2</sup> C 调试器
SIGNAL GENERATOR:	信号发生器
PATTERN GENERATOR:	模式发生器
AC/DC VOLTMETERS/AMMETERS:	交直流电压表和电流表

### (4) 曲线图表

曲线图表可以用来分析电路的各种特性, 如电路的转移特性分析、频谱分析、噪声分析和失真度分析等。单击绘图工具栏下的 图标 (Graph mode), 就可以选择各种曲线图表。常用的曲线图表主要有以下几种。


ANALOGUE:	模拟图表
-----------	------

DIGITAL:	数字图表
MIXED:	混合分析图表
FREQUENCY:	频率分析图表
TRANSFER:	转移特性分析图表
NOISE:	噪声分析图表
DISTORTION:	失真分析图表
FOURIER:	傅里叶分析图表
AUDIO:	音频分析图表
INTERACTIVE:	交互分析图表
CONFORMANCE:	一致性分析图表
DC SWEEP:	直流扫描分析图表
AC SWEEP:	交流扫描分析图表

### 3. 设计实例


**【例 1.2】**下面以一个简单的实例来展示 Proteus 的原理图绘制与仿真过程。单片机电路设计如图 1.27 所示。电路的核心是单片机 AT89C51。单片机的 P0 口 8 个引脚接 D1~D8 的引脚上，电阻 R1~R8 起限流作用，总线使电路图变得简洁。

#### (1) 将所需元器件加入对象选择器窗口

单击对象选择器按钮，如图 1.28 所示，弹出“Pick Devices”页面，在“Keywords”输入 AT89C51，系统在对象库中进行搜索查找，并将搜索结果显示在“Results”中。

在“Results”栏的列表项中，双击“AT89C51”，则可将“AT89C51”添加至对象选择器窗口。

同理，在“Keywords”栏中分别输入 A700D（电解电容）、CAP（电容）、CRYSTAL（晶振）、LED-RED（发光二极管）、RES（电阻），把所需元件添加到对象选择器窗口。单击“OK”按钮，结束对象选择。

经过以上操作，在对象选择器窗口中已有了 AT89C51、A700D107M006ATE018、CAP、CRYSTAL、LED-RED、RES 元器件对象，若单击元器件，在预览窗口中可看到对应元器件的实物图。此时，可注意到在绘图工具栏中的元器件按钮处于选中状态。

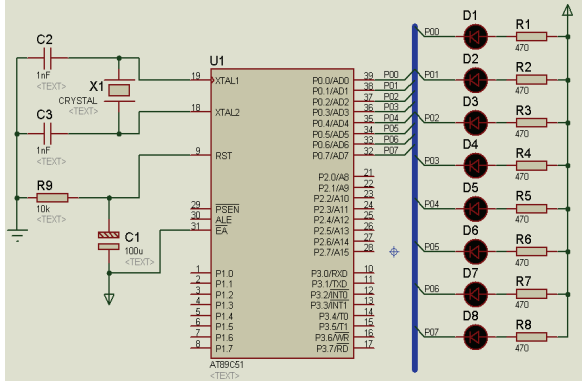


图 1.27 单片机电路设计实例

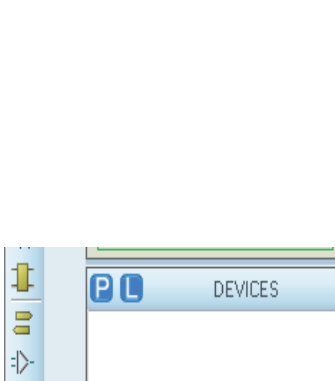



图 1.28 Pick Devices 页面

#### (2) 放置元器件至图形编辑窗口

在对象选择器窗口中，选中 AT89C51，将鼠标置于图形编辑窗口该对象的欲放置位置并单击，完成该对象的放置。同理，将其他所需元器件放置到图形编辑窗口中，如图 1.29 所示。其中接地信号和电源信号在“端点方式”按钮中选择。双击元器件，可更改其属性，如双击电

阻 R1, 就可以更改它的属性, 如图 1.30 所示。

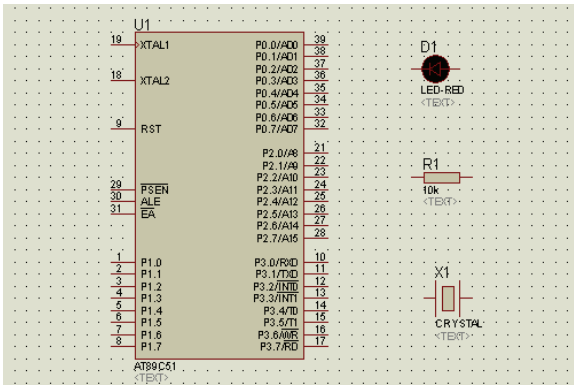


图 1.29 AT89C51 的实物图

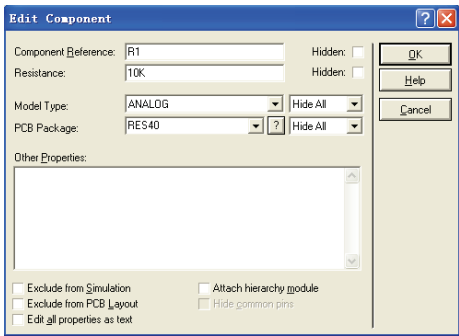


图 1.30 电阻属性对话框

若对象位置需要移动, 将鼠标的指针移到该对象上并单击, 此时注意到该对象的颜色已变成红色, 表明该对象已被选中, 按住鼠标左键并拖动鼠标, 将对象移至新位置后松开鼠标, 完成移动操作。

由于电阻 R1~R8 的型号和电阻值均相同, 因此可利用复制功能作图。将鼠标的指针移到 R1 并单击, 选中 R1, 在标准工具栏中, 单击复制按钮, 拖动鼠标并单击, 将对象复制到新位置, 如此反复, 直到单击鼠标右键, 结束复制。此时已经注意到, 系统自动加以区分电阻名的标识。

### (3) 放置总线至图形编辑窗口

单击绘图工具栏中的总线按钮, 使之处于选中状态。将鼠标的指针置于图形编辑窗口并单击, 确定总线的起始位置; 移动鼠标的指针, 到总线的终止位置双击, 以表示确认并结束画总线操作。

### (4) 元器件之间的连线

Proteus 的智能化可以在画线时进行自动检测。下面来操作将电阻 R1 的左端连接到 D1 的右端。当鼠标的指针靠近 R1 左端的连接点时, 跟着鼠标的指针就会出现一个红色的“□”号, 表明找到了 R1 的连接点, 单击并移动鼠标的指针 (不用拖动鼠标), 将鼠标的指针靠近 D1 右端的连接点, 跟着鼠标的指针就会出现一个红色的“□”号, 表明找到了 D1 的连接点, 同时屏幕上出现了粉红色的连接, 单击此连接线, 粉红色的连接线变成了深绿色, 同时, 线形由直线自动变成了 90°的折线, 如图 1.31 所示, 这是因为选中了按钮 (线路自动路径功能)。

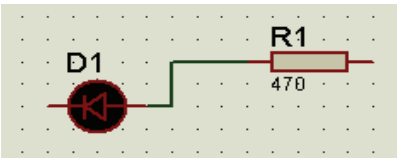


图 1.31 自动连线示意图

Proteus 具有线路自动路径功能 (简称 WAR), 当选 中两个连接点后, WAR 将选择一个合适的路径连线。WAR 可通过使用标准工具栏里的“WAR”命令按钮来关闭或打开, 也可以在菜单栏的“Tools”下找到这个图标。

同理, 可以完成其他连线。在此过程的任何时刻, 可以按 Esc 键或者右击来放弃连线。

### (5) 总线连线和总线标签

画总线时, 为了和一般的导线区分, 一般喜欢画斜线来表示分支线, 此时需要自己决定走线路径, 只需在想要拐点处单击即可。

单击绘图工具栏中的导线标签按钮, 使之处于选中状态。将鼠标的指针置于图形编辑窗口欲标标签的导线上, 跟着鼠标的指针就会出现一个“×”号, 表明找到了可以标注的导线,

单击导线，弹出编辑导线标签窗口，如图 1.32 (a) 所示。在“String”栏中，输入标签名称（如 P00），单击“OK”按钮，结束对该导线的标签标定。同理也可以标注其他导线的标签，连接效果如图 1.32 (b) 所示。

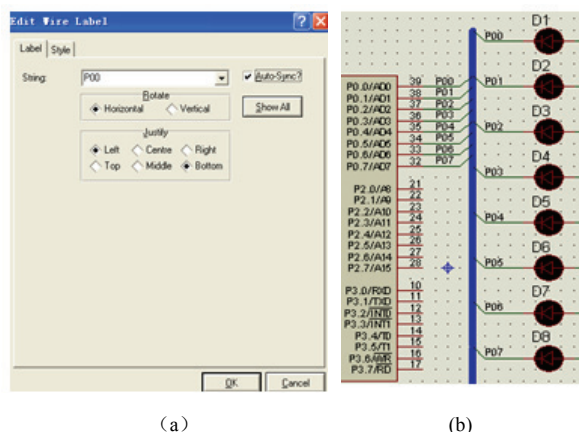


图 1.32 总线标号对话框和连接效果图

注意：在标定导线标签的过程中，相互接通的导线必须标注相同的标签名。

**【例 1.3】** 基于 AT90S8515 的频率测量系统的设计。利用 555 定时器设计一个频率发生电路；利用 AT89S51 单片机进行频率测量；利用数码管将频率测量值进行显示。

该设计分为信号源设计、软件程序设计和信号测量电路设计 3 个部分。

#### (1) 信号源设计

① 单击对象选择按钮“P”，添加以下元件：10WATTOR1（电阻）、AUDIO100N（电容）和 555。

② 单击左边第一个 按钮，在元件列表中选择 GROUND、POWER（电源和地）；单击绿色按钮，在元件列表中选择 OSCILLOSCOPE（示波器）。

③ 按照图连接好元件，如图 1.33 所示。

④ 运行仿真，得到待测信号源。

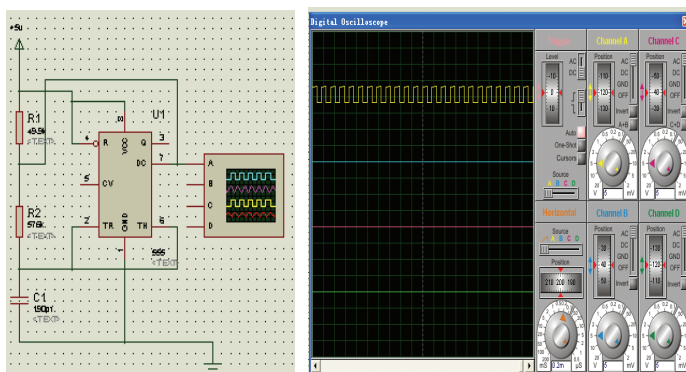


图 1.33 待测信号源设计和仿真图

#### (2) 软件程序设计

① 打开 Keil C51 软件，建立程序设计项目。

② 设计频率计测量程序（C 语言）。

③ 编译环境设置：单击 Keil 软件的“Project”菜单，选择“Options for Target‘Target1’”



选项，弹出如图 1.34 所示对话框，此对话框可对 Keil 软件进行相应设置。勾选“Output”选项卡中的“Creat Hex file”选项（该设置非常重要），编译后就可以生成相应的\*.HEX 文件，以便于 Proteus 仿真时调用。

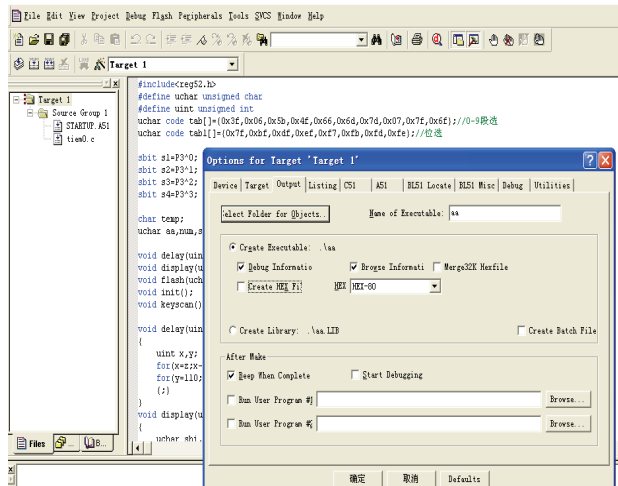








图 1.34 Keil 设置对话框

(3) 信号测量电路设计和仿真

① 单击对象选择按钮“P”，添加以下元件：RES（电阻）、7404（非门）、AT89C51（单片机）、74HC138（译码器）、7SEG\_MPX6\_CA\_BLUE（数码管）和 CLOCK（待测信号源）。

② 单击左边第一个       按钮，在元件列表中选择 GROUND、POWER（电源和地）。

③ 按照电路图连接好元件；选择单片机 AT89S51，用鼠标左键（注意不是右键，此处容易弄反）单击，弹出对话框如图 1.35 所示，在“Program File”选项后面加载 Keil 软件生成的\*.HEX 机器代码文件，单击“OK”按钮即可。

④ 运行仿真，得到测试结果。

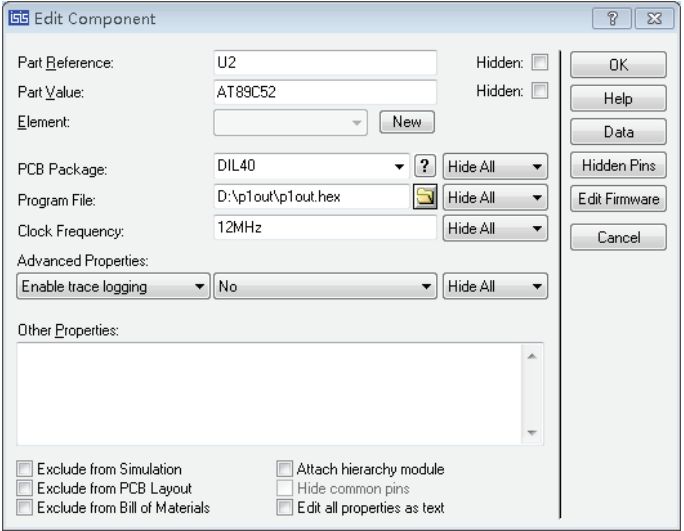


图 1.35 Proteus 单片机属性对话框

## 本章小结

本章主要介绍了机器码的形式、微机中的常用编码、微计算机的结构及典型代表、单片机的特点和集成开发环境等内容。

(1) 机器码包括原码、反码和补码 3 种形式，其中加减运算主要通过补码实现，乘除运算通过原码进行。

(2) 微机中的常用编码包括 ASCII 码和 BCD 码，其中 ASCII 码是一种 7 位代码，共有 128 个编码；BCD 码是一种 4 位二进制码，用来表示 0~9 这 10 个数码，BCD 码有 8421 码、余 3 码、5421 码和 2421 码等很多种形式，其中 8421 码应用最为广泛。

(3) 微型计算机是一个复杂的工作系统，由 CPU、存储器和输入/输出接口电路构成，CPU 和各部件之间通常由数据总线、地址总线和控制总线进行通信连接。CPU 是微型计算机的核心，通常由算术逻辑单元、累加器、标志寄存器、程序寄存器、指令寄存器、指令译码器等基本单元构成。

(4) 单片微型计算机自问世以来受到人们的极大关注和重视，目前单片机已成功地应用在智能仪表、机电设备、过程控制、数据处理、自动检测和家用电器等各个方面。

(5)  $\mu$ Vision 是 Keil 公司开发的基于 Windows 平台的单片机集成开发环境，包含一个高效的编译器、项目管理器和一个 MAKE 工具。

(6) Proteus 是英国 Labcenter 公司开发的电路分析与实物仿真软件，它运行于 Windows 操作系统上，可以在没有单片机实际硬件的条件下利用 Proteus 进行仿真，仿真结果可以直接应用于真实设计中，极大地提高了单片机应用系统的设计效率。

## 思考题及习题

1.1 写出下列二进制数的原码、反码和补码（设字长为 8 位）。

(1) 001011

(2) 100110

(3) -001011

(4) -111111

1.2 已知 X 和 Y，试计算下列各题的  $[X+Y]_{\text{补}}$  和  $[X-Y]_{\text{补}}$ （设字长为 8 位）。

(1) X=1011, Y=0011

(2) X=1011, Y=0111

(3) X=1000, Y=1100

1.3 微型计算机由哪几部分构成？微机系统由哪几部分构成？

1.4 什么叫单片机？它有何特点？

1.5 单片机有哪几种供应状态？

## 第2章 微型计算机的存储器

### 2.1 微型计算机存储器概述

存储器在微型计算机中是用来存储程序和数据的重要部件，程序和数据预先通过输入设备送到存储器中，在程序执行的过程中再从存储器中取出送到 CPU 中，有了它计算机才能有记忆功能，才能把要计算和处理的数据以及程序存入计算机，使计算机脱离人的直接干预，自动地工作。

存储器是由若干个存储单元组成的，每个存储单元又由若干个储存电路组成，一般一个储存电路能存储 1 位 (bit) 二进制信息，通常将 8 位存储电路结合在一起构成 1 个最基本的存储单元，称为 1 字节 (Byte)，所以一个存储器芯片的容量定义为

存储器芯片的容量=单元数×(位数/单元)

每个存储单元都有各自的地址标记，CPU 可以按地址来访问它的每一单元，所以存储器必须有自己的地址线来帮助外部器件来访问存储器的单元。1 位地址线可以区分 2 个单元，不难推出  $n$  根地址线可以区分  $2^n$  个单元，如：当  $n=10$ ，则有  $2^n=1024$  个存储单元。在计算机中为便于记忆和交流，将 1024Byte 称为 1KB，这里 K 的量纲为 1024，与重量、长度、频率中的量纲  $k=1000=10^3$  不一样。

当  $n=20$ ， $2^{20}B=2^{10} \times 2^{10}B=1024KB$ ，称为 1MB，很明显这里的  $1M=2^{20}$ ，同样的道理  $1G=2^{30}$ ， $1T=2^{40}$ ，表 2.1 为存储器单元量纲符号与值对应表。

若一个存储器的单元数为 32K，每单元 8 位，那么它的容量通常写作为 32K×8 位，也可记为 256K 位。

表 2.1 存储器单元量纲符号与值的对应表

存储器单元量纲符号	值
K	$2^{10}$
M	$2^{20}$
G	$2^{30}$
T	$2^{40}$

在 PC 中，存储器从它与 CPU 的位置关系可以分为内部存储器（简称内存）和外部存储器（简称外存）两种。正在运行的程序和相应的数据都要存放在内存中，外存则是相当于程序和数据的仓库，用来长期保存程序和数据，内存速度快，容量小；外存速度慢，容量大。

计算机中大量的操作是 CPU 与存储器交换信息。但是，存储器的工作速度远低于 CPU，所以，存储器的工作速度是影响计算机系统数据处理速度的主要因素。计算机系统对存储器的要求是：容量大、读/写速度快，但容量大、速度快与成本低是矛盾的，容量大、速度快必然使成本增加。

为此，现代计算机系统都采用多级存储体系结构：内部存储器、磁盘存储器及网络存储器，如图 2.1 所示。

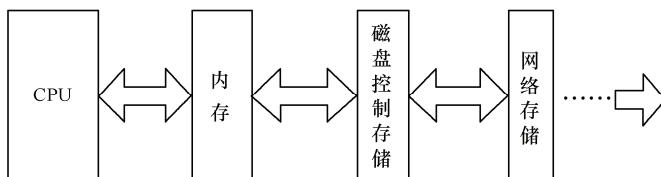


图 2.1 多级存储层次结构

在实际应用中，内存（即内存条）又称为主存储器（或主存），容量较大，目前主流为 2GB 或 4GB，但现在由于内存不是很贵，所以 8GB 的也不少，工作速度比 Cache 慢。但目前所用的 SDRAM、DDR SDRAM 和 RDRAM 型内存性能已有极大的提高。

为了使大容量的内存能与 CPU 进行信息快速交换，在 CPU 与内存之间还设计有 1~2 级高速缓冲存储器（Cache），现在一般集成在 CPU 芯片内，Cache 容量较小，目前一般为几 MB，其工作速度几乎与 CPU 相当。

除内部存储器之外的存储器统称为外部存储器（或外存），目前主流是磁介质存储器，容量迅速提高，现在主流是几 TB 的硬盘，速度也提高很快，成本也在不断下降，已成为微型计算机的主流外部存储器。另外，还有 NAND 闪存组成的固态硬盘，其特点是性能高；光存储器现在较新的是蓝光光盘。

微型计算机用到的存储器分类如下。

### 1. 按制造工艺分类

按制造工艺分，可将半导体存储器分为双极型和 MOS 型两类。

#### （1）双极型

由 TTL 晶体管逻辑电路构成。该类存储器件工作速度快，但集成度低、功耗大、价格偏高。

#### （2）金属氧化物半导体型

简称 MOS 型。该类型有多种制作工艺，如 N 沟道 MOS、HMOS（高密度 MOS）、CMOS（互补型 MOS）、CHMOS（高速 CMOS）等。该类存储器的集成度高、功耗低、价格便宜，但速度较双极型器件慢。

### 2. 按使用属性分类

按使用属性分，可将半导体存储器分为 ROM 和 RAM 两类。

#### （1）ROM

ROM（Read-Only Memory，只读存储器），在一般情况下只能读出所存信息，而不能重新写入。信息的写入是通过工厂的制造环节或采用特殊的编程方法进行的。信息一旦写入，就能长期保存，掉电亦不丢失，所以 ROM 属于非易失性存储器件。

ROM 可分为以下 5 种类型。

① 掩模式（Masked）ROM，简称 ROM。该类芯片通过工厂的掩模制作，已将信息做在芯片当中，出厂后不可更改。

② 可编程（Programmable）ROM，简称 PROM。该类芯片允许用户进行一次性编程，此后便不可更改。

③ 可擦除（Erasable）PROM，简称 EPROM。一般指可用紫外光擦除的 PROM。该类芯片允许用户多次编程和擦除。擦除时，通过向芯片窗口照射紫外光的办法来进行。

④ 电可擦除（Electrically Erasable）PROM，简称 EEPROM，也称 E<sup>2</sup>PROM。该类芯片允许用户多次编程和擦除，用户可在线进行擦除、编程等操作。

⑤ 闪存（Flash Memory），是一种新型的容量大、速度快、电可擦除可编程只读存储器。

#### （2）RAM

RAM（Random Access Memory，随机存取存储器），也称随机存储器或读/写存储器。顾名思义，对这种存储器，信息可以根据需要随时写入或读出。对于一般的 RAM 芯片，掉电时信息将会丢失。

根据 RAM 的结构和功能，又可分为两种类型：静态 RAM 和动态 RAM。

① 静态（Static）RAM，即 SRAM。它以触发器为基本存储单元，所以只要不掉电，其所

存信息就不会丢失。在构成小容量的存储系统时如单片机应用系统一般选用 SRAM，在微型计算机中普遍用 SRAM 构成高速缓冲存储器。

② 动态 (Dynamic) RAM，即 DRAM。一般用 MOS 型半导体存储器件构成，需要进行定时刷新，集成度高、价格低廉，所以多用在存储容量较大的系统中。目前，微型计算机中的内存几乎都是使用动态 RAM。

### (3) 新型存储器件

随着微型计算机使用的深入，也出现了一些新型存储器，像 FRAM、MRAM。

FRAM (铁电存储器)，利用铁电晶体的铁电效应实现数据存储，FRAM 的特点是速度快，能够像 RAM 一样操作，掉电数据不丢失。为同时需要使用 SRAM 和 E<sup>2</sup>PROM 的应用系统找到一种新的途径，但受铁电晶体特性制约，FRAM 仍有最大访问次数的限制。

MRAM (非挥发性随机存取存储器)，具有静态随机存储器 (SRAM) 的高速存储能力、高集成度，基本上可以无限次地重复写入的特点。

## 2.2 只读存储器

只读存储器 (ROM) 有两个显著的优点：

① 结构简单，所以位密度比可读/写存储器高；

② 具有非易失性，所以可靠性高。

通常采用 ROM 存放系统监控程序、数据表格等。

### 2.2.1 只读存储器的结构及分类

ROM 的基本结构框图如图 2.2 所示，ROM 的电路结构主要由地址译码器、存储矩阵和输出缓冲器组成。

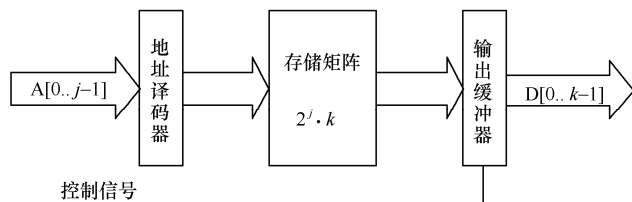


图 2.2 ROM 的基本结构框图

地址译码器根据地址总线信号，选中相应的存储单元。译码器有  $j$  条地址输入线，可以寻址  $2^j$  个存储器单元。

存储矩阵由  $2^j$  个存储单元组成，每个存储单元为  $k$  位，存储器的容量是  $2^j \times k$  位。

输出缓冲器具有三态功能，受控制信号的控制，当控制信号有效时，才将存储单元的数据输出到数据总线  $D_0 \sim D_{k-1}$  上，否则数据总线  $D_0 \sim D_{k-1}$  呈现高阻状态。

#### 1. 掩模工艺 ROM

这种 ROM 一般由生产厂家根据用户的要求而定制，适合于大批量生产和使用。这种 ROM 的结构简单，集成度高，但制作掩模的成本也很高，只有在大量生产某种定型的 ROM 产品时才采用该工艺定制所需的 ROM。

掩模型 ROM 可用来存储计算机用的某些标准程序，如监控程序、BASIC 语言的解释程序

等；也可以用来存储固定的数据表格，如数学用表等。

根据制造工艺，掩模型 ROM 又可分为 MOS 型和双极型两种，MOS 型功耗小，但速度比较慢，微型机系统中用的 ROM 主要是这种类型。双极型速度比 MOS 型快，但功耗大，只用在速度较高的系统中。

存储器从译码方式上来看，有字译码结构和复合译码结构两种，MOS 只读存储器也不例外。

(1) 字译码结构

图 2.3 为一个简单的  $4 \times 4$  位的 MOS ROM。采用字译码方式，两位地址输入，经译码后，输出 4 条选择线，每一条选中一个字，位线输出即为这个字的各位，即数据线。在图示的存储矩阵中，有的列连有 MOS 管，有的列没有连 MOS 管，这是在制造时由二次光刻版的图形（掩模）所决定的，所以把它叫做掩模式 ROM。

在图 2.3 中，地址译码器为 2-4 译码器，设译码输出 1 为有效，若地址信号  $A1A0=01$ ，选中字线 2，字线 2 为高电平，若有 MOS 管与其相连，如位线 1 和位线 4，则相应的 MOS 管导通，于是位线输出为“0”；而位线 2 与位线 3，没有 MOS 管与字线相连，则输出为“1”。由此可见，当某一字线被选中时，连有 MOS 管的位线输出为“0”；而没有 MOS 管相连的位线，输出为“1”。图 2.3 中的存储矩阵的内容见表 2.2。

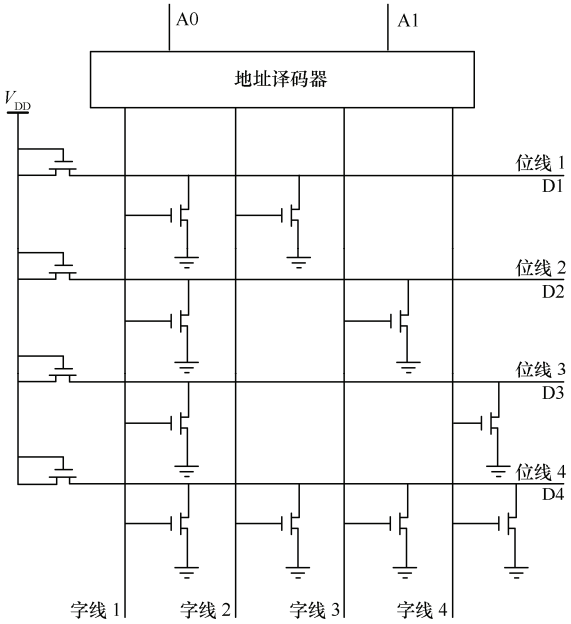


图 2.3  $4 \times 4$  位的 MOS ROM 图

(2) 复合译码结构

当地址线数  $j$  增大时，译码器的输出线数将会呈指数规律上升，变得很大，给工艺加工带来不便。实际设计中，往往采用行、列两个方向同时译码的复合译码结构，图 2.4 所示是一个  $4096 \times 1$  的 MOS ROM 结构图。4096 个单元若采用字译码结构，12 根地址线，会有 4096 根输出线，现在将 12 条地址信号线分成两组，分别经过行和列译码，分别产生  $2^6=64$  根选择线，共计 128 根选择线，这比字译码结构输出线要少很多。

表 2.2 ROM 的内容				
字 \ 位	位 1	位 2	位 3	位 4
字 1	0	0	0	0
字 2	0	1	1	0
字 3	1	0	1	0
字 4	1	1	0	0

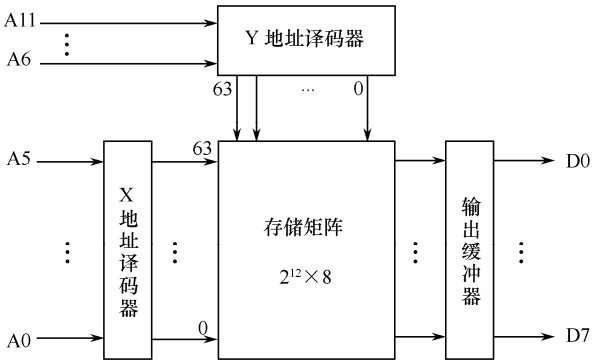


图 2.4 复合译码 ROM 的结构图

## 2. 可编程的只读存储器 PROM

PROM 只允许用编程器写入一次，PROM 在出厂时，存储的内容全为 1，用户可以根据需要将其中的某些单元写入数据 0，以实现对其“编程”的目的。PROM 的典型产品有“双极型熔丝结构”的 PROM 和使用“肖特基二极管”的 PROM 两种。

## 3. 可擦除可编程只读存储器 EPROM

EPROM 是国内用得较多的程序存储器。其特点是具有可擦除功能，擦除后即可进行再编程，用户可反复编程使用，但是缺点是擦除需要使用紫外线照射一定的时间。这一类芯片特别容易识别，在芯片外壳上方的中央有一个圆形窗口“石英玻璃窗”，在紫外线照射下，存储器中的各位信息均变“1”，即处于擦除状态。擦除干净的 EPROM 可以通过编程器将应用程序固化到芯片中。由于阳光中有紫外线的成分，一个编程后的 EPROM 芯片的“石英玻璃窗”一般使用黑色不干胶纸盖住，以防止遭到阳光直射，避免因阳光照射而破坏程序。

EPROM 的典型芯片是 Intel 公司的 27 系列产品，如 2716（2KB）、2732（4KB）等，随着电可擦除存储器件的大量出现，EPROM 存储器将慢慢退出主流市场。

## 4. 可电擦除的可编程只读存储器 EEPROM

EEPROM 又称 E<sup>2</sup>PROM，这是一种用电信号编程也用电信号擦除的 ROM 芯片，其最大优点是可直接用电信号擦除，也可用电信号写入。具有 ROM 的非易失性，又具有 RAM 的随机读/写的特性。芯片存储的信息能保留长达 20 年之久，具有几百次到几千次不等的改写次数，只是内容擦除和写入的时间比较长，约 10ms，为了保证有足够的写入时间，通常用软件或硬件来检测写入周期。

E<sup>2</sup>PROM 可以通过读/写操作进行逐个存储单元读出和写入，且读/写操作与 RAM 几乎没有什么差别，所不同的只是写入速度慢一些，而断电后却能保存信息。因 E<sup>2</sup>PROM 重编程时间比较长，有效重编程次数也比较低，所以 E<sup>2</sup>PROM 不能取代 RAM。E<sup>2</sup>PROM 芯片对硬件电路没有特殊要求，操作也简单，作为 ROM 使用时就按照 EPROM 方式连线及进行单元地址编址即可。

典型 E<sup>2</sup>PROM 芯片有 24C04、28C16、2864、CAT24C256 等。

## 5. 快闪存储器 ROM（Flash ROM）

Flash ROM 是在 EPROM 和 E<sup>2</sup>PROM 的基础上发展起来的。Flash ROM 的读/写速度很快，存取时间可达 20ns，所以也叫闪速存储器，简称“闪存”。目前很多单片机内均采用 Flash 作为程序存储器，其使用与扩展方法和 E<sup>2</sup>PROM 一样。

闪速存储器在 EPROM 工艺的基础上增添了芯片电擦除和可再编程功能，使其成为性价比和可靠性高、擦写快、非易失的 E<sup>2</sup>PROM 存储器。很多 Flash 内部集成有 DC/DC 变换器，使读、擦除、编程使用单一电压（根据不同型号，有的是单一+5V，有的是单一+3V），从而使在系统编程（ISP）成为可能，这种芯片可重复擦写 10 万次以上，数据可靠保持超过 10 年。

闪速存储器必须按块（Block）擦除，每个区块的大小不定，不同厂家的产品有不同的规格，而 E<sup>2</sup>PROM 则可以一次只擦除一字节（Byte），因此目前闪存也被广泛用在 PC 的主板上，用来保存 BIOS 程序，便于进行程序的升级，同时也广泛用作硬盘的替代品，具有抗震、速度快、无噪声、耗电低的优点，但是将其用来取代 RAM 就显得不合适，因为 RAM 需要能够按字节改写。

常见典型 Flash ROM 芯片有 AT29C256（32K×8 位）、AT29LV040A（512K×8 位）和 Am29F016B（2M×8 位）等。

## 2.2.2 只读存储器典型产品举例

### 1. 27256 EPROM

27256 EPROM 的结构框图如图 2.5 所示。27256 是一个  $32\text{K} \times 8$  位，即 256K 位的 EPROM，需要 15 条地址输入线，有 8 条数据线。该系列的产品还有 2716、2764、27128 等，输出和编程以及各种工作方式主要由两条控制线——片选信号  $\overline{\text{CE}}$  和输出允许信号  $\overline{\text{OE}}$  控制。27256 的最大访问时间为 350ns。27256 的 DIP28 封装引脚排列如图 2.6 所示。

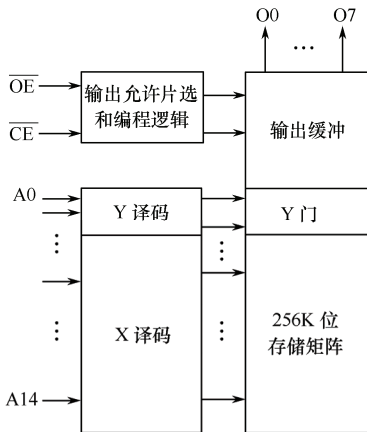


图 2.5 27256 结构框图

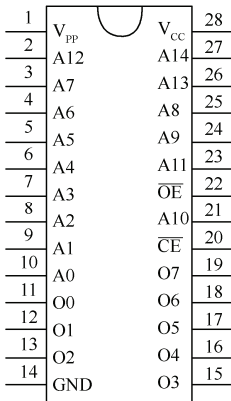


图 2.6 27256 的 DIP28 封装引脚排列

27256 有 8 种工作方式，这些工作方式的选择见表 2.3。

表 2.3 27256 工作方式选择表

方式 \ 引脚	$\overline{\text{CE}}$ (20)	$\overline{\text{OE}}$ (22)	$V_{\text{PP}}$ (1)	A9 (24)	$V_{\text{CC}}$ (28)	输出端 (11~13, 15~19)
读	低	低	$V_{\text{CC}}$	×	$V_{\text{CC}}$	数据输出
编程	低	高	$V_{\text{PP}}$	×	$V_{\text{CC}}$	数据输入
校验	高	低	$V_{\text{PP}}$	×	$V_{\text{CC}}$	数据输出
编程禁止	高	高	$V_{\text{PP}}$	×	$V_{\text{CC}}$	高阻
备用	高	×	$V_{\text{CC}}$	×	$V_{\text{CC}}$	高阻
输出禁止	低	高	$V_{\text{CC}}$	×	$V_{\text{CC}}$	高阻
Intel 标识符	低	低	$V_{\text{CC}}$	$V_{\text{H}}$	$V_{\text{CC}}$	编码
Intel 编程方法	低	高	$V_{\text{PP}}$	×	$V_{\text{CC}}$	数据输入

注:  $V_{\text{H}}=12.0\text{V} \pm 0.5\text{V}$ ,  $V_{\text{CC}}=5\text{V}$ ,  $V_{\text{PP}}=12\text{V}$ , × 为高或低均可。

#### (1) 读方式

这是 27256 正常的使用方式，此时两条电源引线  $V_{\text{CC}}$  和  $V_{\text{PP}}$  都接 +5V，当要从一个地址单元读数据时，CPU 先通过地址引线送来地址信号，接着用控制信号使  $\overline{\text{CE}}$  和  $\overline{\text{OE}}$  都有效。于是经过一段时间，指定单元的内容就可以读出到数据输出引脚上。

#### (2) 备用方式

当某一片 27256 未被选中时，为了降低芯片的功耗，设了一种备用方式。只要  $\overline{\text{CE}}$  为高电平，则 27256 就工作在备用方式，此时，最大电流由 125mA 降为 50mA，输出端处于高阻状态。



### (3) 编程方式

当芯片出厂时，或利用紫外线擦除后，所有单元的所有位的信息全为“1”，只有经过编程才能使“1”变为“0”。电源  $V_{CC}$  端仍接+5V，而  $V_{PP}$  端必须接+12V； $\overline{CE}$  端保持低电平，而  $\overline{OE}$  保持高电平，对于每个地址单元，输出端  $O0\sim O7$  被用于数据输入，出现在这几个端口上的数据将被写入 EPROM 中，地址线上出现的地址则决定信息写入哪个存储单元中。

### (4) 编程禁止

若在编程时，有若干个27256 并联，有的芯片的编程要禁止，则只要将该芯片的  $\overline{CE}$  端变为高电平即可。

### (5) 校验

在编程过程中，为了检查编程时写入数据是否正确，通常在编程过程中包含校验操作，在一个字节的编程完成以后，电源的接法不变， $\overline{CE}$  保持高电平，令  $\overline{OE}$  变为低电平，则同一单元的数据在  $O0\sim O7$  上输出，就可以与要输入的数据相比较，校验编程是否正确。

## 2. 24C04 4K 位串行 $E^2$ PROM

24C04 是一个 4K 位串行 CMOS  $E^2$ PROM，内部分成 32 页，每页 16 字节，存储空间为  $32\times 16=512$  字节 ( $4096/8=512$ )。24C04 可编程/擦除百万次，数据可保存 100 年；具有写保护功能，通过拉高 WP 引脚，可以禁止对存储器写入，从而保护了整个存储器。它的引脚排列见图 2.7，引脚功能见表 2.4。

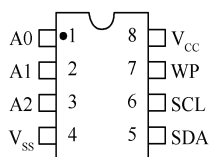


图 2.7 24C04 引脚配置

表 2.4 引脚功能表

引脚名称	功能
A0, A1, A2	器件地址选择
SDA	串行数据/地址
SCL	串行时钟
WP	写保护
$V_{CC}$	+1.8~6.0V 工作电压
$V_{SS}$	地

24C04 支持  $I^2C$  总线数据传送协议，通过控制器件地址输入端 A0、A1 和 A2 可以实现将最多 8 个 24C04 器件连接到总线上。通过  $I^2C$  总线可对器件进行字节写、页面写、写保护、字节读、连续读等操作。

## 2.3 随机存储器

随机存储器 (RAM)，是指存储单元的内容可按需随意取出或存入。这种存储器在断电时将丢失其存储内容，它和 ROM 的区别在于这种存储器不但可以随时读取已存放在其中的各个存储单元的数据，而且还能随时直接写入新的信息，不需像  $E^2$ PROM 那样必须先将原来的信息擦除。常用来存储运算产生的中间数据、外面采集到的数据、临时存放的数据等。

随机存取存储器的内部结构一般可分为地址译码、存储矩阵、三态输出缓冲器和读/写控制逻辑电路 4 个部分，其结构框图示于图 2.8。从结构上看，RAM 和 ROM 差不多，但是 RAM 的数据线因为有既可读出又可写入的要求，故输出缓冲器是双向的。图中的读/写控制线用来选择要进行的是读操作还是写操作。片选信号线用来决定该芯片是否将要进行读/写操作，地址信号决定将要存储器的哪个单元进行操作。

随机存取存储器的基本工作过程是：首先得到地址信号和片选信号，片选信号有效则该芯片被选中，地址信号决定是对存储器的哪个单元进行操作；然后得到读/写控制信号，根据读/写信号的电平来确定是进行读操作还是写操作。

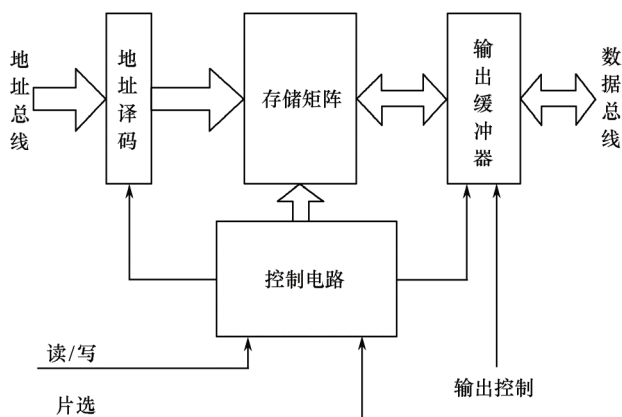


图 2.8 随机存取存储器结构框图

若是读操作，芯片就将地址总线所对应存储体单元的数据送到输出缓冲器，在得到输出控制信号有效时，再将该数据放到数据总线上。

若是写操作，芯片在写信号有效时就将数据总线上的数据写入芯片存储体的一个单元，到底写到哪个单元，由地址总线信号决定。

若片选信号无效，该芯片不进行任何操作，输出缓冲器的输出线呈高阻状态，可实现该芯片输出缓冲器与外部数据总线的隔离。

按制造工艺分类，RAM 分为双极型和 MOS 型两大类。

### 1. 双极型 RAM 的特点

- ① 存储速度快。
- ② 以晶体管的触发器作为基本存储电路，故管子较多。
- ③ 与 MOS 相比集成度较低。
- ④ 功耗大。
- ⑤ 成本高。

所以，双极型 RAM 主要用在对速度要求较高的微型机中或作为 Cache。

### 2. MOS 型 RAM

用 MOS 器件构成的 RAM，又可分为静态（Static）RAM（有时用 SRAM 表示）和动态（Dynamic）RAM（有时用 DRAM 表示）两种。

#### （1）静态 RAM 的特点

- ① 多管构成的触发器作为基本存储电路。
- ② 集成度高于双极型，但低于动态 DRAM。
- ③ 不需要刷新，故可省去刷新电路。
- ④ 功耗比双极型低，但比动态 RAM 高。

⑤ 易于用电池作为后备电源（RAM 的一个重大问题是当电源去掉后，RAM 中的信息就会丢失。为了解决这个问题，就要求当交流电源掉电时，能自动地转换到一个电池供电的低压后备电源，以保持 RAM 中的信息）。

- ⑥ 存取速度较动态 RAM 快。

#### （2）动态 RAM 的特点

- ① 基本存储电路可以用单管线路组成（依靠电容存储电荷）。
- ② 集成度高；

③ 比静态 RAM 的功耗更低。

④ 价格比静态 RAM 便宜。

⑤ 因动态存储器靠电容来存储信息，由于总是存在着泄漏电流，故需要定时刷新。典型的是要求每隔 1ms 刷新一遍。

MOS 型存储器因其集成度高、功耗低、价格便宜而得到广泛应用，所以这里主要介绍 MOS 型 RAM 存储器。

### 2.3.1 静态基本存储电路

MOS 触发器静态 RAM 是用 MOS 管作为基本记忆元件。图 2.9 是一个 NMOS 八管静态基本存储单元电路。输入信号主要有 X 地址译码线和 Y 地址译码线，统称为字线，I/O 和  $\overline{I/O}$  是

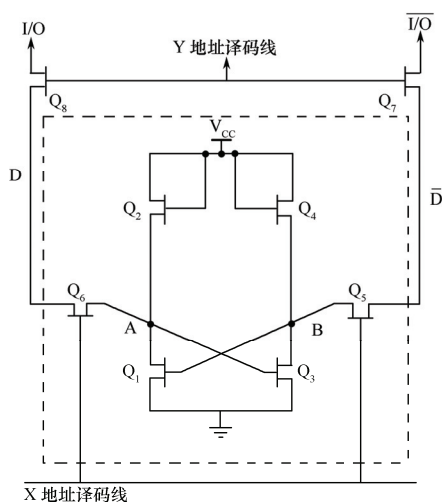


图 2.9 八管静态基本存储单元

与外部连接的数据信号线，可输入，也可作为输出，D 和  $\overline{D}$  统称为位线。Q<sub>1</sub>~Q<sub>4</sub> 组成静态触发器，Q<sub>1</sub>、Q<sub>3</sub> 为控制管，Q<sub>2</sub>、Q<sub>4</sub> 为负载。触发器有两个不同的稳定状态：Q<sub>1</sub> 截止时 A=“1”（高电平），它使 Q<sub>3</sub> 导通，于是 B=“0”（低电平），而 B=“0”又保证了 Q<sub>1</sub> 截止。所以，这种状态是稳定的。同样，Q<sub>1</sub> 导电，Q<sub>3</sub> 截止的状态也是互相保证而稳定的。因此，可以用这两种不同状态分别表示“1”或“0”。

当 X 译码输出线为高电平时，则 Q<sub>5</sub>~Q<sub>6</sub> 导通，A、B 端就与位线 D 和  $\overline{D}$  相连；当这个电路被选中时，相应的 Y 译码输出也是高电平，Q<sub>7</sub>、Q<sub>8</sub> 也是导通的，于是，存储器内部的 D 和  $\overline{D}$  就与外部的输入/输出电路 I/O 及  $\overline{I/O}$  相通。当写入时，写入信号自 I/O 和  $\overline{I/O}$  线输入，若要写“1”，则 I/O 线为“1”，而  $\overline{I/O}$  线为“0”。它们通过 Q<sub>8</sub>、Q<sub>7</sub> 以及 Q<sub>6</sub>、Q<sub>5</sub> 分别与 A 端和 B 端相连，使 A=“1”，B=“0”，这样

Q<sub>3</sub> 导通、Q<sub>1</sub> 截止，相当于把输入电荷存储于 Q<sub>1</sub> 和 Q<sub>3</sub> 的栅极。当输入信号及地址选择信号消失后，Q<sub>5</sub>、Q<sub>6</sub>、Q<sub>7</sub>、Q<sub>8</sub> 都截止，由于存储单元有电源和两负载管，可以不断地向栅极补充电荷，所以靠两个反相器的交叉控制，只要不掉电就能保持写入的信号“1”，而不用再刷新。若要写入“0”，原理一样。

读出时，只要某一电路被选中，相应的 Q<sub>5</sub>、Q<sub>6</sub> 导通，A、B 点分别与位线 D 和  $\overline{D}$  相通，且 Q<sub>7</sub>、Q<sub>8</sub> 也导通，故存储电路的信号被送至 I/O 及  $\overline{I/O}$  线上，供外部总线读取。信息读出以后并不影响触发器中所存储的信息，故称为非破坏性读出。

当字线为低电平时，Q<sub>5</sub>、Q<sub>6</sub> 截止，使触发器与位线 D 和  $\overline{D}$  隔离。这时，基本存储电路内的信息既不能读出，也不能写入，只是保持原存储信息不变，故称此时为维持状态。

一个基本存储电路只能存放 1 位二进制数，若一条字线接到几个存储电路的传输门，就可以构成一个存储单元。再由许多个存储单元按阵列的形式排列，便可构成一个存储体，配上所需的如地址译码等控制电路，即可得到我们所说的存储芯片。

由此可见，静态 RAM 触发器在有电源的情况下，可以存入数据也可以读出数据。在掉电之后，存入的信息将全部消失。

2.3.2 动态基本存储电路

图 2.10 为单管动态存储单元电路示意图，动态基本存储电路是利用 MOS 管栅极和源极之间的极间电容  $C_1$  来存储信息的。 $C_1$  上存有电荷，表示存有信息“1”，否则就表示存有信息“0”。虽然 MOS 管是高阻器件，漏电流小，但漏电流总还是存在的，因此  $C_1$  上的电荷经一段时间后就会泄放掉（一般为 2ms），故不能长期保存信息。为了维持动态存储电路所存储的信息，必须使信息再生（即进行刷新）。MOS 管  $Q_1$  作为一个开关， $Q_2$  为同一列电路所公用， $C_0$  为位线对地的寄生电容， $C_0 \gg C_1$ 。

由于电容  $C_1$  很小（为 0.1~0.2μF），所以读出的信号很弱，需要进行放大。另外在每次读出后，由于  $C_1$  上电荷的损失，原先存储内容受到破坏（改变），因而还必须把原来信号重新写入（再生）。

为了读出动态存储电路的数据，在读数前需要对数据线进行预充电。读出和写入操作均需按严格的定时时序脉冲进行，因此，动态 RAM 芯片内要有时钟电路。

刷新过程就是先读出信息（不送到数据线上，此时 Y 选择线置 0），经放大后再传送给位线，通过写入操作来完成。

由此可见，动态存储电路具有集成度高、成本低、功耗低，但由于刷新，需要有较复杂的外围控制电路，所以只有在构成大容量的存储系统时（如 PC）才有较高的性价比。

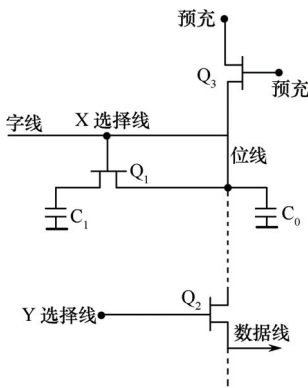


图 2.10 单管动态存储单元

2.3.3 RAM 芯片介绍

1. 静态 Intel 2128 NMOS RAM 芯片

Intel 2128 是 2K×8 位的静态 RAM，单一+5V 供电，8 位数据线 D0~D7，一个片选端  $\overline{CE}$ ，一个输出允许端  $\overline{OE}$ ，一个写控制端  $\overline{WE}$ ，11 根地址线。其引脚排列如图 2.11 所示，与 2716、2732 兼容。

2128 RAM 的功能表见表 2.5。

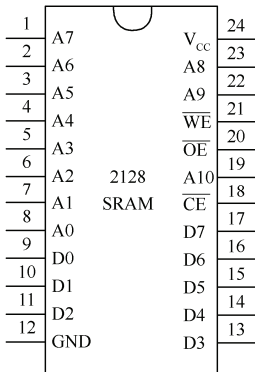


图 2.11 2128 RAM 的引脚排列及逻辑符号

表 2.5 RAM 的功能表

引脚 状态 方式	$\overline{CE}$	$\overline{WE}$	$\overline{OE}$	D0~D7
未选中	1	任意	任意	高阻抗
输出禁止	0	1	1	高阻抗
读出	0	1	0	数据输出
写入	0	0	任意	数据输入

在  $\overline{CE}$  为高电平（无效）时，存储器没有被选中，既不能读出也不能写入，处于一种维持状态，功耗自动降低到工作时的 1/4 左右。

## 2. Intel 2116 动态存储器

Intel 2116 芯片是  $16\text{K} \times 1$  位动态 RAM，有 16 个引脚，16K 位应有 14 条地址信号线，但 2116 引脚只有 7 个地址信号引线端 A0~A6，既是列地址，又是行地址，通过两个控制信号——列地址选通信号  $\overline{\text{CAS}}$  和行地址选通信号  $\overline{\text{RAS}}$  来区别。2116 DRAM 的引脚排列如图 2.12 所示。

Intel 2116 在工作时， $\overline{\text{RAS}}$  先有效，输入行地址 A0~A6，存入芯片内部的行地址锁存器，然后  $\overline{\text{CAS}}$  有效，将随之而来的 A0~A6 为列地址 A7~A13 存入列地址锁存器。

2116 只要  $\overline{\text{RAS}}$  信号有效时，该芯片开始工作，芯片三态数据输出端只受  $\overline{\text{CAS}}$  控制。

读操作：当  $\overline{\text{RAS}}$  和  $\overline{\text{CAS}}$  都为低电平， $\overline{\text{WE}}$  保持高电平时，所选中的存储单元信息送到数据输出总线。

写操作：当  $\overline{\text{RAS}}$  和  $\overline{\text{CAS}}$  都为低电平，而  $\overline{\text{WE}}$  保持低电平时，将数据线的信息写入指定单元。

刷新操作：刷新是按行进行的，要在 2ms 的时间里对 A0~A6 的 128 个地址轮流刷新一遍。刷新操作只需使  $\overline{\text{RAS}}$  为低电平，写入行地址，而  $\overline{\text{CAS}}$  为高电平（不必读列地址），就可以对行地址所对应的 128 个存储单元同时进行刷新。为配合刷新，芯片外部还要设计相应的刷新电路。

动态 RAM 的数据线一般只有一条，所以在实用中厂家或商家通常是将 8 片动态 RAM 装配在一个 RAM 条上出售，以简化系统的电路连接。

随着微电子技术的发展，新 RAM 芯片或器件不断推出，像 HY57V641620 芯片具有  $4\text{M} \times 16$  位的存储空间，带有自动刷新电路，这里就不介绍了。

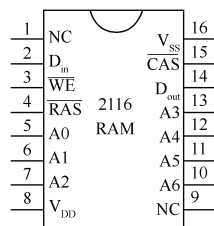


图 2.12 2116 DRAM 引脚排列及逻辑符号

## 2.4 Flash 存储器

在过去的 20 多年里，单片机及嵌入式系统一直使用 ROM (EPROM) 作为它们的存储设备，然而近年来 Flash 逐渐替代 ROM (EPROM) 在嵌入式系统中的地位，用作存储引导程序 (Bootloader) 及操作系统或者程序代码的载体，或者直接当硬盘使用。

Flash 存储器 (Flash Memory)，全称为 Flash E<sup>2</sup>PROM Memory，又名闪速存储器（简称闪存），是一种长寿命的非易失性（在断电情况下仍能保持所存储的数据信息）的存储器，数据删除不是以单个字节为单位而是以固定的区块为单位的，区块大小一般为 256KB~20MB。闪存是电子可擦除只读存储器 (E<sup>2</sup>PROM) 的升级，E<sup>2</sup>PROM 是在字节层次进行删除和重写的，而闪存是按区块进行擦写的，这样闪存自然就比 E<sup>2</sup>PROM 的更新速度要快。闪存成本低、密度大、速度快的特点使其广泛地运用于各个领域。

### 2.4.1 Flash 类型及应用

全球闪速存储器的供应商主要有 AMD、Atmel、Fujitsu、Hitachi、Hyundai、Intel 等，从技术架构来分，主要有 NOR、NAND 等几大阵营。

#### 1. NOR 技术

##### (1) NOR

基于 NOR 技术（也称为 Linear 技术）的闪速存储器出现最早，目前仍是多数供应商支持

的技术架构，具有可靠性高、随机读取速度快的优势，广泛用于 PC 的 BIOS 固件、移动电话、硬盘驱动器的控制存储器等。

NOR 技术特点：

- ① 程序和数据可存放在同一芯片上，拥有独立的数据总线和地址总线，能快速随机读取；
- ② 可以单字节或单字编程，但不能单字节擦除，必须以块为单位或对整片执行擦除操作，在对存储器进行重新编程之前需要对块或整片进行预编程和擦除操作。

由于NOR技术的闪存其擦除和编程速度较慢，而块尺寸又较大，因此擦除和编程操作所花费的时间很长，在纯数据存储和文件存储的应用不多。不过，仍有支持者用它完成以写入为主的应用，如 Compact Flash (CF) 卡。在单片机和部分 ARM 处理器中，仍然使用 Nor Flash 作为程序存储器。

## (2) DINOR

DINOR (Divided bit-line NOR) 技术从一定程度上改善了 NOR 技术在写性能上的不足，DINOR 技术和 NOR 技术一样具有快速随机读取的功能，按字节随机编程的速度略低于 NOR，而块擦除速度快于 NOR。DINOR 技术在执行擦除操作时无须对页进行预编程，且编程操作所需电压低于擦除操作所需电压，这与 NOR 技术相反。

Mitsubishi 公司推出的 DINOR 技术器件——M5M29GB/T320，将闪存存储器分为 4 个存储区，在向其中任何一个存储区进行编程或擦除操作的同时，可以对其他三个存储区中的一个进行读操作，用硬件方式实现了在读操作的同时进行编程和擦除操作，而无须外接 E<sup>2</sup>PROM。由于有多条存取通道，因而提高了系统速度。该芯片有先进的省电性能，在待机和自动省电模式下仅有 0.33μW 功耗，在数字蜂窝电话、汽车导航和全球定位系统等领域中应用较多。

## 2. NAND 技术

### (1) NAND

NAND 技术特点有：

- ① 以页为单位进行读和编程操作，1 页为 256B 或 512B (字节)；以块为单位进行擦除操作，1 块可以为 4KB、8KB 或 16KB。具有快编程和快擦除的功能，其块擦除时间是 2ms；而 NOR 技术的块擦除时间达到几百 ms。

- ② 数据、地址采用同一总线，实现串行读取。随机读取速度慢且不能按字节随机编程。

- ③ 芯片尺寸小，引脚少，是位成本 (bit cost) 最低的固态存储器，已突破每千兆字节 1 美元的价格限制。

- ④ 芯片包含失效块，其数目最大可达到 3~35 块 (取决于存储器密度)。失效块不会影响有效块的性能，但设计者需要将失效块在地址映射表中屏蔽起来。

### (2) UltraNAND

UltraNAND 技术与 NAND 标准兼容；拥有比 NAND 技术更高等级的可靠性；可用来存储代码，从而首次在代码存储的应用中体现出 NAND 技术的成本优势；它没有失效块，因此不用系统级的查错和校正功能，能更有效地利用存储器容量。

## 2.4.2 NOR 和 NAND Flash 存储器的使用区别

NOR 芯片内可以执行 XIP (eXecute In Place) 指令，CPU 通过三总线可直接读取存储在 NOR 中的指令，这样应用程序可以直接在 Flash 闪存内运行。NOR 的传输效率很高，在 1~4MB 的小容量时具有很高的性价比，但是很低的写入和擦除速度大大影响了它的性能。实用中当闪存只是用来存储少量的代码时，NOR 闪存更适合一些。



NAND 结构能提供极高的单元密度,可以达到高存储密度,并且写入和擦除的速度也很快,在实用中 NAND 则是高数据存储密度的理想解决方案,但NAND Flash 由于接口不兼容,CPU 无法直接从 NAND Flash 中读取指令,通常把代码先复制到 SDRAM 等内存中,再从 SDRAM 执行程序。由于 SDRAM 等内存的读/写速度远远高于 Flash,所以在 SDRAM 中执行代码,性能可以大大提高。

### 2.4.3 闪存 AT29LV040A 芯片介绍

Atmel 公司生产的 NOR 闪存 AT29LV040A 可与各种单片机连接。

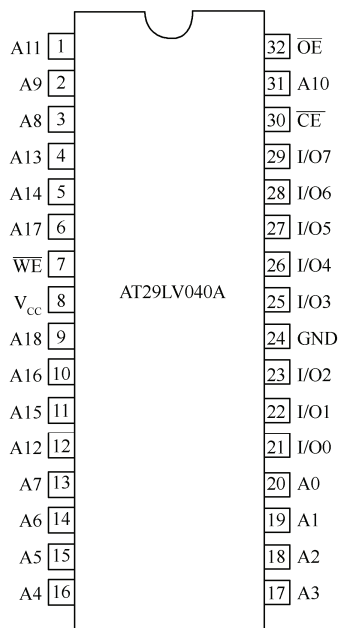


图 2.13 AT29LV040A 引脚图

$\overline{\text{OE}}$ ——输出允许(读)信号线;

$\overline{\text{WE}}$ ——写允许信号线;

I/O0~I/O7——三态双向数据线。

#### 3. AT29LV040A 的读操作

AT29LV040A 的读操作与静态 RAM 完全类似。当  $\overline{\text{CE}} = 0$ ,  $\overline{\text{OE}} = 0$ ,  $\overline{\text{WE}} = 1$  时,被选中的地址单元的内容读出到外部总线上;当  $\overline{\text{CE}}$  或  $\overline{\text{OE}}$  处于高电平时,输出线处于高阻态。

#### 4. 数据写入及编程操作

在数据写入操作中,A0~A7 提供页内单元地址,A8~A18 提供页地址。 $\overline{\text{CE}} = 0$ ,  $\overline{\text{OE}} = 1$ ,  $\overline{\text{WE}} = 0$  时,外部写入 AT29LV040A 的数据先装入内部锁存器,数据写入以页为单位进行,因此要改写某单元内容时,整页都要重写。没有被装入的字节内存单元被写成 0FFH。页写入过程中,在前一次  $\overline{\text{CE}}$  或  $\overline{\text{WE}}$  上升沿之后 150 $\mu$ s 内, $\overline{\text{CE}}$  和  $\overline{\text{WE}}$  要再次有效,以便写入新的字节,整个写入周期中  $\overline{\text{CE}}$  和  $\overline{\text{WE}}$  应 256 次有效。当某次  $\overline{\text{CE}}$  和  $\overline{\text{WE}}$  上升沿后 150 $\mu$ s 的时间内没有  $\overline{\text{CE}}$  和  $\overline{\text{WE}}$  的下降沿来到时,表示装入周期结束。开始内部写入周期时,装入起始地址由用户根据需要任意指定。

#### 1. AT29LV040A 的主要性能

- 快速读取时间: 150ns。

- 单一电压下在线编程(编程前自动擦除)电压: 3.3V $\pm$ 0.3V。

- 存储容量: 4Mbit (512KB $\times$ 8)。

- 以 256 字节为一页的页写入操作,片内带 256 字节的地址数据锁存。

- 单页写入时间 20ms, 芯片擦除时间 20ms。

- 低功耗:读/写电流 15mA, 维持电流 40nA。

- CMOS 工艺,10000 次擦除写入寿命,数据可保存 10 年。

- 输入/输出与 TTL、CMOS 电平兼容。

- 温度范围:商用为 0~70 $^{\circ}$ C,工业用为-40~85 $^{\circ}$ C。

#### 2. AT29LV040A 的引脚图和引脚介绍

图 2.13 是 AT29LV040A 的引脚图,各引脚功能如下:

A0~A18——地址线;

$\overline{\text{CE}}$ ——片选线;

对于程序代码及大批量数据或数据库,可通过编程器对 AT29LV040A 直接写入,操作简单方便;对于程序运行过程中的数据处理,可通过以 256 字节为单位的页编程写入,虽然写入是以页为单位,但写入时字节数可小于 256,不足 256 字节的内容必须读出重写,否则将被填入 0FFH。写周期为 20ms。图 2.14 是写入流程图。

## 2.5 存储器的组成与扩展

CPU 一般不配置存储器,对于微型计算机的用户来说,在设计一个应用系统时,往往需要用户设计自己所需的存储器系统,来完成程序和数据的存储。

CPU 和存储器之间的连接,要考虑较多的问题,下面只介绍存储器的组成与扩展。

### 2.5.1 存储器芯片的选择

存储器系统设计时首先要考虑的是存储器芯片的选择,考虑的因素主要是存储器的类型、芯片的容量、芯片的读/写速度等。

#### 1. 类型

根据实际应用需要,考虑适合工作需要的存储器类型,如选 ROM 还是选 RAM,选静态 RAM 还是选动态 RAM 等。

一般来说,如果存储器用来存放已调试好的程序或固定常数,则应选用 ROM,在样机研制或小批量生产时可选用 EPROM,大批量生产时可采用掩模 ROM。

如果用来存放经常变化的数据则选 RAM,若系统较小,存储容量不大,常选用静态 RAM,如单片机应用系统;若系统存储容量较大,可选用动态 RAM,如 PC。

Flash 存储器既可以作为程序存储器,也可以作为数据存储器。作为程序存储器时具有在线擦除和改写功能,也可以作为数据存储器,存入的数据不会因为断电而消失,但 Flash 存储器的改写速度比 RAM 的写入速度要慢得多。

#### 2. 容量

存储容量的大小要根据系统的实际需要来定,同时适当考虑系统的后续扩充需要。

#### 3. 工作速度

存储器工作速度满足 CPU 的读/写速度要求,才能有效地完成数据的传送。反映存储器工作速度的是存储器的存取时间  $t_m$ ,它是指从收到有效的地址信号到读出的数据放在数据线上稳定为止的这段时间。

计算机对存储器的访问时间  $t_c$ ,指从 CPU 送出有效地址到 CPU 采样数据总线的这段时间。要实现有效访问,必须有

$$t_m < t_c$$

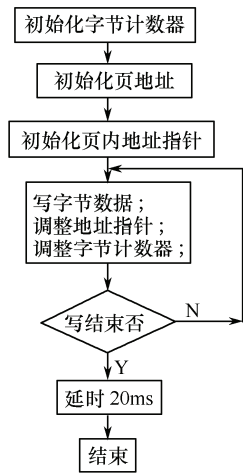


图 2.14 AT29LV040A 编程流程图



2.5.2 存储器的扩展

1. 存储器位数的扩展

当存储器位数不满足要求时，需要进行存储器位数的扩展，例如图 2.15：要构成  $2K \times 16$  位只读存储器，可以采用两片  $2K \times 8$  位的存储器构成，将两个芯片的地址线  $A0 \sim A10$  分别连在一起，两个芯片的片选信号  $\overline{CS}$  及读/写控制信号  $\overline{WE}$  也都各自连接到一起，而数据输出端各自独立，一片输出为  $D0 \sim D7$ ，另一片输出为  $D8 \sim D15$ 。这样，当 CPU 发出一组地址信号和片选信号后，这两个片子同时被选中，从而组成一个完整的 16 位存储单元输出。

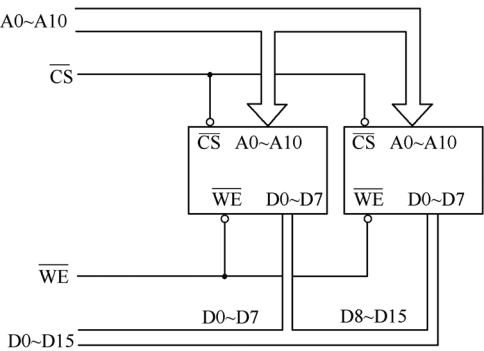


图 2.15 存储器位数的扩展

选中这就是片选问题。片选有两种方法：“线选法”和“译码法”，而译码法又可以分为“全译码”和“部分译码”。

2. 存储单元的扩展

当存储器的单元数不够时，需要进行存储器存储单元的扩展，如  $2K \times 8$  位芯片扩展为  $16K \times 8$  位，需要用 8 片这样的芯片。这时，若 CPU 发出某一单元的读/写命令，应该只有一个芯片被选中，如何被选中

(1) 线选法

线选法就是用低位地址线来完成对每片内的存储单元的寻址，然后用余下的高位地址线直接接到芯片的片选端实现芯片的选择。

例如，对于  $2K \times 8$  位芯片需 11 条地址线，故用  $A10 \sim A0$ 。然后用余下的高位地址  $A15 \sim A11$  来区别各个芯片，可以区别 5 个这样的芯片。图 2.16 只接了 4 片，构成  $8K \times 8$  位存储器芯片组，用  $A14 \sim A11$  作线选，设片选端  $CS$  高电平有效，则芯片 1 和芯片 2 的地址范围分析如下，芯片 3 和芯片 4 不难得出，分别为  $2000H \sim 27FFH$ 、 $4000H \sim 47FFH$ 。

芯片	A15	A14	A13	A12	A11	A10	...	A0	地址范围
#1	0	0	0	0	1	0	...	0	0800H~0FFFH
	0	0	0	0	1	1	...	1	
#2	0	0	0	1	0	0	...	0	1000H~17FFH
	0	0	0	1	0	1	...	1	

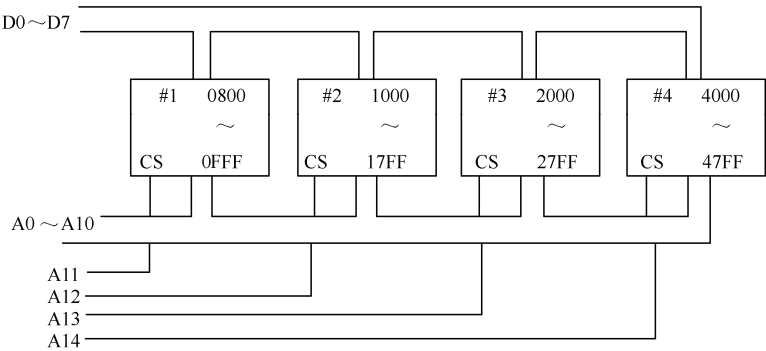


图 2.16 存储器线选法的扩展

可见，用线选法构成的存储器，接线简单，但是有明显的不足：

- 各芯片的地址是不连续的；
- 存在大量的地址空间浪费。

所以这种连接方法只适合于较小的存储器系统。

### (2) 全译码

用低位地址线实现各芯片内的存储单元寻址，而其余的全部高位地址线经过译码器译码以后作为各芯片的片选信号，这种选片方式称为全译码。

例如，由 4 片  $2K \times 8$  位芯片构成  $8K \times 8$  位存储器，片内单元寻址用  $A_{10} \sim A_0$ ，将其余的 5 条高位地址线  $A_{15} \sim A_{11}$  输入到一个 5-32 地址译码器，其输出用作片选。如图 2.17 所示，若  $A_{15} \sim A_{11} = 11110$  时  $\overline{Y}_{30} = 0$ ，片 3 的  $\overline{CS}$  有效；若  $A_{15} \sim A_{11} = 11101$  时  $\overline{Y}_{29} = 0$ ，片 2 的  $\overline{CS}$  有效。则片 3、片 2 的地址范围分析如下：

芯片	A15	A14	A13	A12	A11	A10	...	A0	地址范围
#2	1	1	1	0	1	0	...	0	E800H~EFFFH
	1	1	1	0	1	1	...	1	
#3	1	1	1	1	0	0	...	0	F000H~F7FFH
	1	1	1	1	0	1	...	1	

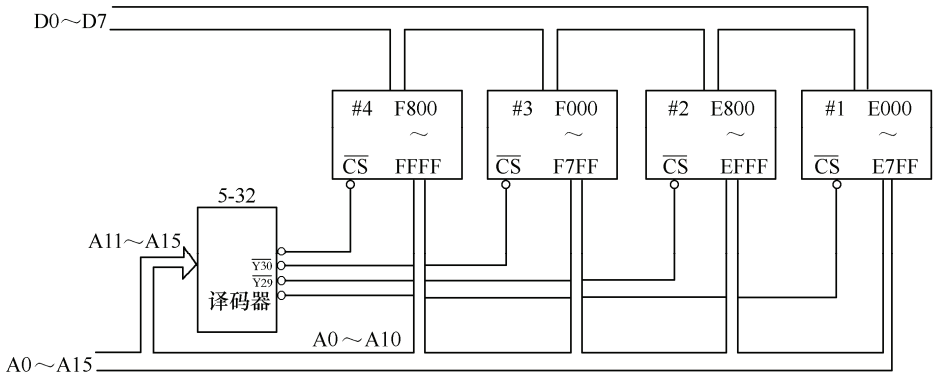


图 2.17 全译码构成的  $8K \times 8$  位存储器

全译码时，高位地址可以出现任意排列，在每块芯片的地址范围是唯一的，同时，寻址空间也得到充分利用。如在上例中扩展至  $8K \times 8$  位后，仍有  $56K \times 8$  位地址可供进一步扩展。

### (3) 部分译码

全译码是将其余的全部高位地址线经过译码器译码以后作为各芯片的片选信号，若只将高位地址线的一部分经过译码器译码以后作为各芯片的片选信号，这样的片选方式称为部分译码。

例如，要用 4 片  $2K \times 8$  位芯片构成  $8K \times 8$  位存储器，由于 4 片芯片需要 4 个片选信号，可以采用 2-4 译码器，这种连接方案示于图 2.18。A13、A12、A11 是无关位，所以该方案的每个单元都有 8 套地址。没有用到的高位地址（这里是 A13A12A11）可设为“0”，这样确定的地址称为芯片的“基本地址”。片 1 和片 2 的地址分析如下：

芯片	A15	A14	A13	A12	A11	A10	...	A0
#1	0	0	×	×	×	0	...	0
	0	0	×	×	×	1	...	1
#2	0	1	×	×	×	0	...	0
	0	1	×	×	×	1	...	1

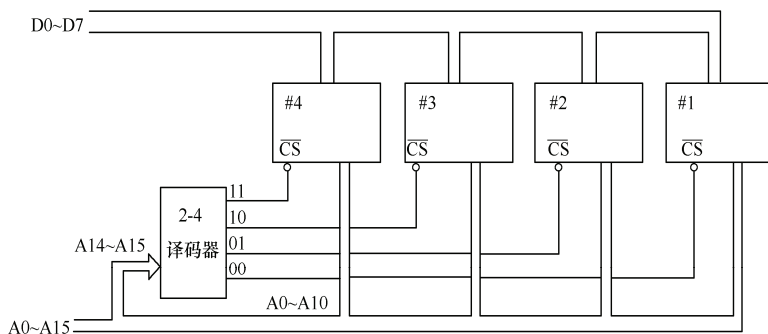


图 2.18 部分译码构成的 8K×8 位存储器

很明显，部分译码时各芯片地址不是唯一的，也就是说多个地址都可以选中同一芯片的同一单元，这就是所谓的地址重叠。这样的地址重叠，造成这些地址在该系统中不能另作他用，这就影响了系统地址区的有效使用，也就限制了存储器的扩展。例如图 2.18，尽管是 8K×8 位存储器，但占用了 8 个 8K×8 位存储空间，所以在选用部分译码时，要尽可能多一些高位地址参与译码。

### 3. 存储单元和位数同时扩展

如果存储器芯片既要扩展位数，又要扩展存储器单元，下面将举例说明如何连接及连接中应考虑的一些问题。

若用 2114 (1K×4 位) 来扩展 2K×8 位 RAM，这既需要位数的扩展，又需要单元的扩展，现采用全译码方式来进行设计，采用 3-8 译码器 74LS138 作为译码芯片。

设计中，将 A15、A14、A13 分别与 G1、 $\overline{G2A}$ 、 $\overline{G2B}$  连接，A12、A11、A10 分别与 C、B、A 连接，显然当 A15 A14 A13=100 时 74LS138 芯片工作，在 A12 A11 A10=000 时  $\overline{Y0}=0$  有效，A12 A11 A10=001 时  $\overline{Y1}=0$  有效。线路设计图如图 2.19 所示，地址分配分析如下：

A15	A14	A13	A12	A11	A10	A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	地址
G1	$\overline{G2A}$	$\overline{G2B}$	C	B	A											
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8000H
⋮																
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	83FFH
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8400H
⋮																
1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	87FFH

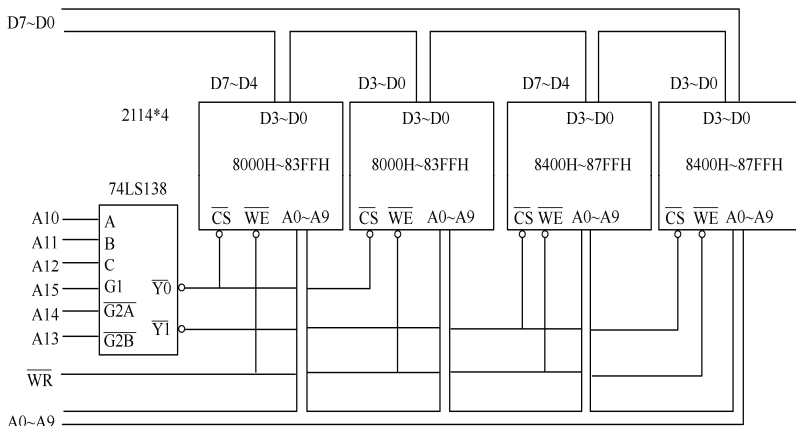


图 2.19 由 1K×4 位扩展的 2K×8 位线路连接图

由译码器来实现存储器扩展，其线路连接非常灵活，地址范围也相应地变化，这可以根据实际情况来设计，在单片机的 I/O 扩展中，其 I/O 地址的确定也是这样来设计的。

在应用系统中，考虑到系统的扩展需要，都设计了若干译码输出端供后续扩展用，这时译码输出端往往是一个地址范围。由于 51 单片机存储器与 I/O 是统一编址的，所以译码输出端可以作为存储器的片选信号，也可以作为 I/O 端口的选择信号，表 2.6 是图 2.19 中 74LS138 各输出端的地址范围。

若设计中 A15~A10 与 74LS138 的连接不一样，其地址范围就相应地发生变化，如 A15 经过一个非门接到 G1，A14 与 A13 相与非后接到 G2A，G2B 接地，其他连接不变，则要想使 74LS138 工作，则 A15=0，A14 与 A13 同时为 1，Y0 输出地址范围为 6000H~ 63FFH，其他输出端地址范围同理，请读者自行分析。

表 2.6 74LS138 的各输出端地址范围

$\overline{Y_0}$	8000H~83FFH
$\overline{Y_1}$	8400H~87FFH
$\overline{Y_2}$	8800H~8BFFH
$\overline{Y_3}$	8C00H~8FFFH
$\overline{Y_4}$	9000H~93FFH
$\overline{Y_5}$	9400H~97FFH
$\overline{Y_6}$	9800H~9BFFH
$\overline{Y_7}$	9C00H~9FFFH

A15	A14	A13	A12	A11	A10	A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	地址
G1			C	B	A											
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6000H
⋮																
0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	63FFH

## 本章小结

本章介绍了只读存储器 ROM、随机存取存储器 RAM 及 Flash 存储器的基本原理、特点及类别，详细讲述了存储器系统的扩展技术。

(1) 只读存储器 ROM: 把信息写入以后，能长期保存，不会因电源断电而丢失信息，一旦写入以后，就不能随意更改，在计算机的运行过程中，只能读出而不能写入信息，常用来存放固定的程序和数据。ROM 主要有出厂就写入数据的掩模 (Masked) ROM、允许用户进行一次性编程的可编程 PROM、允许用户多次擦除的 EPROM、用户可电可擦除的 E<sup>2</sup>PROM 以及闪存。

(2) 随机存取存储器 RAM: 在计算机的运行过程中，信息可以根据需要随时写入或读出，掉电时信息将会丢失。RAM 可分为静态 RAM 和动态 RAM。静态 RAM (SRAM)，只要不掉电，其所存信息就不会丢失，在构成小容量的存储系统时如单片机应用系统常用；动态 RAM (DRAM) 工作时需要定时刷新，多用在存储容量较大的系统中，如 PC。

(3) 存储器系统的扩展，有位数扩展和单元扩展两种情况，在单元扩展时存在芯片的片选问题，为此有线选法、部分译码和全译码 3 种方式：

线选法是用余下的高位地址线的一根作为片选信号；

全译码是所余的全部高位地址线经过译码后作为芯片的片选信号；

部分译码是所余的一部分高位地址线经过译码后作为芯片的片选信号。

## 思考题及习题

2.1 说明 ROM、EPROM、E<sup>2</sup>PROM 和 Flash 之间的主要区别。

2.2 EPROM、PROM、动态 RAM、静态 RAM 等存储器中，哪几类是可以随时读/写的？

2.3 某 ROM 芯片中有 12 根地址输入端和 8 个数据输出端，该芯片的存储容量是多少位？

2.4 说明动态 RAM 和静态 RAM 的主要区别，使用时应如何选用？

2.5 说明 NOR Flash 与 NAND Flash 的主要区别，使用时应如何选用？

2.6 现有若干片  $2K \times 8$  位的 RAM 芯片，若用线选法组成存储器，有效的寻址范围最大是多少？若用 3-8 译码器来产生片选信号，则有效的寻址范围最大又是多少？若要将寻址范围扩展到 64KB，应选用什么样的译码器来产生片选信号？

2.7 什么是地址重叠区？它对存储器扩展有什么影响？

2.8 如图 2.20 所示，若用  $1K \times 8$  位的芯片来扩展  $3K \times 8$  位 RAM，试计算各片的地址范围为多少？

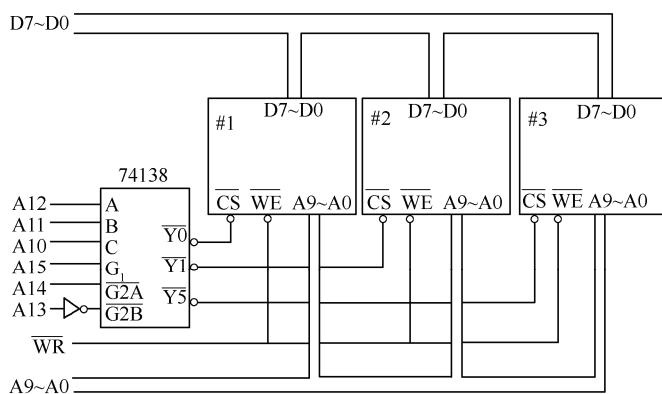


图 2.20  $1K \times 8$  位扩展的  $3K \times 8$  位存储系统

2.9 现有  $8K \times 8$  位 RAM 多片，1 片 3-8 译码器，要构成容量为  $16K \times 8$  位的存储器，请用线选法、部分译码、全译码 3 种方式分别设计，画出连接图，并指出寻址范围。

2.10 如何检查扩展的 RAM 工作是否正常？试编一个简单的 RAM 检查程序，要求此程序能记录有多少个 RAM 单元工作有错且能记录出错的单元地址？

# 第3章 80C51 的结构和原理

## 3.1 80C51 系列概述

### 3.1.1 MCS-51 系列

MCS-51 是 Intel 公司生产的一个单片机系列名称。属于这一系列的单片机有多种，如：8051/8751/8031；8052/8752/8032；80C51/87C51/80C31；80C52/87C52/80C32 等。

该系列生产工艺有两种：一是 HMOS 工艺（高密度窄沟道 MOS 工艺）；二是 CHMOS 工艺（互补金属氧化物的 HMOS 工艺）。

CHMOS 是 CMOS 和 HMOS 的结合，既保持了 HMOS 高速度和高密度的特点，还具有 CMOS 低功耗的特点。在产品型号中，凡带有字母“C”的即为 CHMOS 芯片，CHMOS 芯片的电平既与 TTL 电平兼容，又与 CMOS 电平兼容。

在功能上，该系列单片机有基本型和增强型两大类。

在片内程序存储器的配置上，该系列单片机有 3 种形式，即掩模 ROM、EPROM 或 Flash 和 ROM Less（无片内程序存储器）。

### 3.1.2 80C51 系列

80C51 是 MCS-51 系列中采用 CHMOS 工艺的一个典型品种；各厂商以 80C51 为基核开发出的 CHMOS 工艺单片机产品统称为 80C51 系列。当前常用的 80C51 系列单片机主要产品有：

- Intel 的产品：80C31、80C51、87C51，80C32、80C52、87C52 等；
- Atmel 的产品：89C51、89C52、89C2051 等；
- Philips、华邦、Dallas、Siemens 等公司的许多产品。

### 3.1.3 80C51 的应用模式

按总线结构可分为总线型和非总线型。如常常见到的 89C51 单片机就是总线结构，89C51 单片机内部有数据总线、地址总线、还有控制总线（ $\overline{WR}$ ， $\overline{RD}$ ， $\overline{EA}$ ，ALE 等）。但单片机由于芯片引脚数量的限制，数据总线和地址总线经常采用复用方式，且许多引脚还要与并行 I/O 口引脚兼用。20 引脚的 89S2051 单片机，就是一种非总线型的。其外部的引脚很少，可使成本降低。

单片机应用模式的分类如图 3.1 所示。

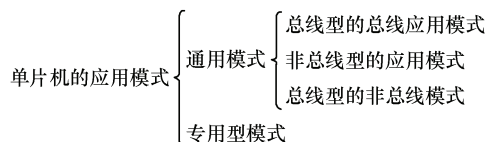


图 3.1 单片机的应用模式分类

1. 总线型单片机应用模式

(1) 总线型单片机的总线应用模式

利用单片机的部分引脚，可以方便地将单片机配置成典型的三总线结构，如图 3.2 所示。这种总线型应用在扩展外围器件比较多时接线会比较复杂，系统的可靠性会降低。因此，在设计系统时，应尽量减少扩展器件的数量。

(2) 总线型单片机的非总线应用模式

总线型单片机也可以采用非总线应用的“多 I/O”模式，如图 3.3 所示。该模式非常适用于大量 I/O 口需求的应用系统。

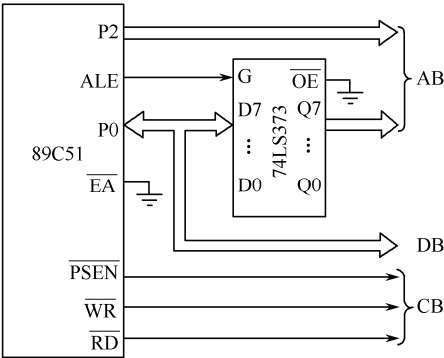


图 3.2 总线型应用的“三总线”模式

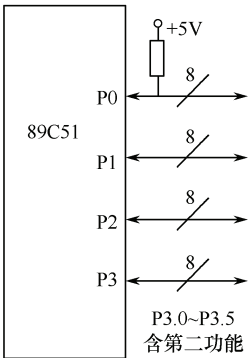


图 3.3 非总线型应用的“多 I/O”模式

2. 非总线型单片机应用模式

非总线型单片机已经将用于外部总线扩展用的 I/O 口线和控制功能线去掉，从而使单片机的引脚数减少、体积减小。对于不需进行并行外围扩展，装置的体积要求苛刻且程序量不大的系统极其适用。非总线型单片机典型产品如 AT89S2051/AT89S4051。

3.2 80C51 典型产品资源配置与引脚

3.2.1 80C51 典型产品资源配置

80C51 典型产品资源配置见表 3.1。

表 3.1 80C51 典型产品资源配置

分类		芯片型号	存储器类型字节数		片内其他功能单元数量			
			ROM	RAM	并口	串口	定时/计数器	中断源
总线型	基本型	80C31	无	128B	4 个	1 个	2 个	5 个
		80C51	4KB 掩模	128B	4 个	1 个	2 个	5 个
		87C51	4KB	128B	4 个	1 个	2 个	5 个
		89C51	4KB Flash	128B	4 个	1 个	2 个	5 个
	增强型	80C32	无	256B	4 个	1 个	3 个	6 个
		80C52	8KB 掩模	256B	4 个	1 个	3 个	6 个
		87C52	8KB	256B	4 个	1 个	3 个	6 个
		89S52	8KB Flash	256B	4 个	1 个	3 个	6 个
非总线型		89S2051	2KB Flash	128B	2 个	1 个	2 个	5 个
		89S4051	4KB Flash	256B	2 个	1 个	2 个	5 个

由表 3.1 可见增强型与基本型有以下不同。

- 片内 ROM 字节数：从 4KB 增加到 8KB；
- 片内 RAM 字节数：从 128B 增加到 256B；
- 定时/计数器从 2 个增加到 3 个；
- 中断源由 5 个增加到 6 个。

### 3.2.2 引脚信号

图 3.4 为 80C51 系列单片机引脚图及逻辑符号，为标准的 40 脚 DIP 封装。这些引脚的功能描述如下：

(1) 电源引脚  $V_{CC}$  和  $V_{SS}$

$V_{CC}$ ：电源端，接 +5V。

$V_{SS}$ ：接地端。

通常在  $V_{CC}$  和  $V_{SS}$  引脚之间接  $0.1\mu F$  高频滤波电容。

(2) 时钟电路引脚 XTAL1 和 XTAL2

XTAL1：接外部晶振和微调电容的一端，在片内它是振荡器倒相放大器的输入，若使用外部 TTL 时钟时，该引脚必须接地。

XTAL2：接外部晶振和微调电容的另一端，在片内它是振荡器倒相放大器的输出，若使用外部 TTL 时钟时，该引脚为外部时钟的输入端。

(3) 地址锁存允许 ALE

在系统扩展时，ALE 用于控制地址锁存器锁存 P0 口输出的低 8 位地址，从而实现数据与低位地址的复用。当单片机上电正常工作后，ALE 端通常以时钟频率的 1/6 的固定频率向外输出正脉冲信号，ALE 的负载能力为 8 个 LS TTL 器件。

(4) 外部程序存储器读选通信号  $\overline{PSEN}$

$\overline{PSEN}$  是读外部程序存储器的选通信号，低电平有效。CPU 从外部存储器取指令时，它在每个机器周期中两次有效。

(5) 程序存储器地址允许输入端  $\overline{EA}/V_{PP}$

当  $\overline{EA}$  为高电平时，CPU 执行片内程序存储器指令，但当 PC 中的值超过 0FFFH 时，将自动转向执行片外程序存储器指令。当  $\overline{EA}$  为低电平时，CPU 只执行片外程序存储器指令。对于 8031，由于其无片内 ROM，故  $\overline{EA}$  必须接低电平。

(6) 复位信号 RST

该信号高电平有效，在输入端保持两个机器周期的高电平后，就可以完成复位操作。此外，该引脚还有掉电保护功能，若在该端接 +5V 备用电源，在使用中若  $V_{CC}$  掉电，可保护片内 RAM 中信息不丢失。

(7) 输入/输出引脚 P0、P1、P2 和 P3

P0 口 (P0.0~P0.7)：该端口为漏极开路的 8 位准双向口，内部没有上拉电阻，该口在做 I/O 口使用时务必要外接上拉电阻，驱动能力为 8 个 LS TTL 负载，它为低 8 位地址线和 8 位数据线的复用端口。

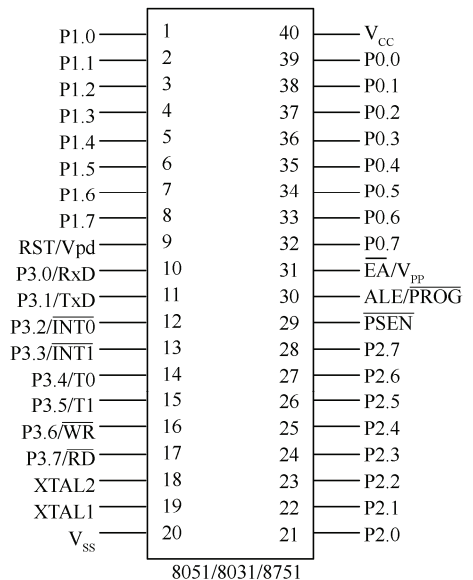


图 3.4 80C51 引脚图外形



P1 口 (P1.0~P1.7): 它是一个内部带上拉电阻的 8 位准双向 I/O 口, P1 口的驱动能力为 4 个 LS TTL 负载。

P2 口 (P2.0~P2.7): 它为一个内部带上拉电阻的 8 位准双向 I/O 口, P2 口的驱动能力也为 4 个 LS TTL 负载。在访问外部程序存储器时, 它作为存储器的高 8 位地址线。

P3 口 (P3.0~P3.7): P3 口同样是内部带上拉电阻的 8 位准双向 I/O 口, P3 口除了作为一般的 I/O 口使用之外, 还具有特殊功能。

### 3.3 80C51 系列单片机的结构

#### 3.3.1 80C51 单片机逻辑结构

80C51 单片机采用的是冯·诺伊曼提出的经典计算机体系结构框架, 即一台计算机由运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备 5 个基本部分组成。80C51 单片机在一块芯片上集成了 CPU、RAM、ROM、定时/计数器和多功能 I/O 口等。80C51 单片机的系统结构框图如图 3.5 所示。

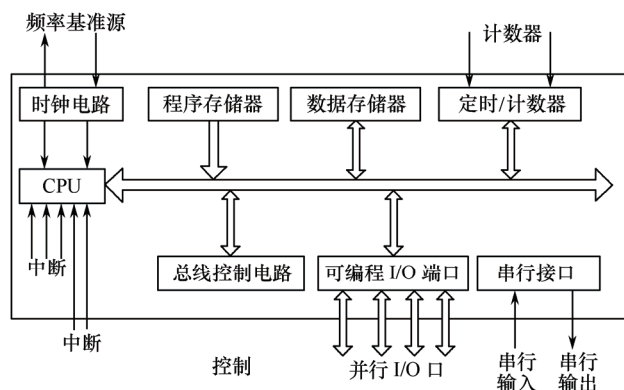


图 3.5 80C51 单片机系统结构框图

由图 3.5 可以看出, 单片机内部主要包含下列几个部件:

- 一个 8 位 CPU;
- 一个时钟电路;
- 4KB 程序存储器;
- 128B 数据存储器;
- 两个 16 位定时/计数器;
- 64KB 扩展总线控制电路;
- 4 个 8 位并行 I/O 端口;
- 一个可编程串行接口;
- 5 个中断源, 其中包括两个优先级嵌套中断。

#### 3.3.2 80C51 单片机内部结构

80C51 单片机的内部结构框图如图 3.6 所示。

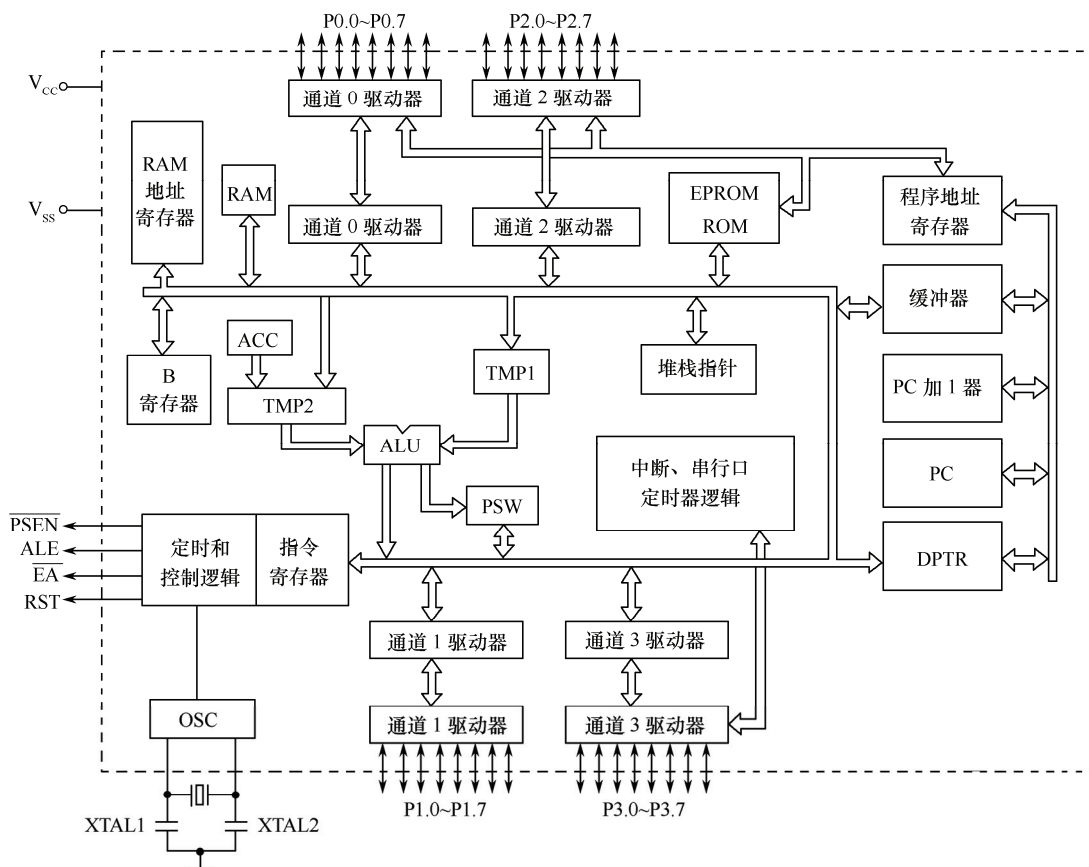


图 3.6 80C51 单片机芯片内部结构框图

## 1. CPU

CPU 即中央处理器的简称，是单片机的核心部件，它完成各种运算和控制操作，CPU 由运算器和控制器两部分电路组成。

### (1) 运算器电路

运算器电路包括 ALU（算术逻辑单元）、ACC（累加器）、B 寄存器、状态寄存器、暂存器 1 和暂存器 2 等部件，运算器的功能是进行算术运算、逻辑运算、位变量处理和数据传送。运算电路以 ALU 为核心单元，可以完成半字节、单字节及多字节数据的运算操作，其中包括加、减、乘、除、十进制调整等算术运算以及与、或、异或、求补和循环等逻辑操作，同时还具有一般微处理器所不具备的位处理功能，运算结果的状态由状态寄存器保存。

### (2) 控制器电路

控制器电路包括程序计数器 PC、PC 加 1 寄存器、指令寄存器、指令译码器、数据指针 DPTR、堆栈指针 SP、缓冲器以及定时与控制电路等。控制电路完成指挥控制工作，协调单片机各部分正常工作。程序计数器 PC 用来存放即将要执行的指令地址。数据指针 DPTR 为 16 位数据指针，它可以对外部数据存储器和 I/O 口进行寻址，它的低 8 位为 DPL（地址 82H），高 8 位为 DPH（地址为 83H）。堆栈指针 SP 随时跟踪栈顶地址，按先进后出的原则存取数据。

## 2. 定时/计数器

80C51 单片机片内有两个 16 位的定时/计数器，可以用于定时控制、延时以及对外部事件的计数和检测等。

### 3. 存储器

80C51 系列单片机的存储器包括数据存储器 and 程序存储器，程序存储器和数据存储器的寻址空间是相互独立的，物理结构也不相同。

### 4. 并行 I/O 口

80C51 单片机共有 4 个 8 位的 I/O 口（P0、P1、P2 和 P3），每条 I/O 线都能独立地用作输入或输出。

### 5. 串行 I/O 口

80C51 单片机具有一个采用通用异步工作方式的全双工串行通信接口。

### 6. 中断控制系统

80C51 共有 5 个中断源，分为高级和低级两个中断优先级。

### 7. 时钟电路

80C51 芯片内部有时钟电路，但晶体振荡器和微调电容必须外接。时钟电路为单片机产生时钟脉冲序列。

### 8. 总线

以上所有组成部分都是通过总线连接起来的。系统的地址信号、数据信号和控制信号都是通过总线传送的，总线结构减少了单片机的连线 and 引脚，提高了集成度和可靠性。

## 3.4 80C51 内部数据存储器（内部 RAM）

### 3.4.1 80C51 的内部数据存储器

80C51 内部 RAM 有 256 个单元，通常在空间上分为两个区；低 128 个单元（00H~7FH）的内部数据 RAM 区和高 128 个单元（80H~0FFH）的专用寄存器 SFR 区。

7FH	用户 RAM 区堆栈、数据缓冲
30H 2FH	
20H 1FH	位寻址区
18H 17H	第 3 组通用寄存器区
10H 0FH	第 2 组通用寄存器区
08H 07H	第 1 组通用寄存器区
00H	第 0 组通用寄存器区

图 3.7 内部数据 RAM 区

#### 1. 内部 RAM 低 128 单元

80C51 低 128 个单元是真正的内部数据 RAM 区，是一个多功能复用性数据存储器，其按用途可分为 3 个区域，如图 3.7 和图 3.8 所示。

##### （1）工作寄存器区（00H~1FH）

工作寄存器区也称为通用寄存器，该区域共有 4 组寄存器，每组由 8 个寄存单元组成，每个单元 8 位，各组均以 R0~R7 作寄存器编号，共 32 个单元，单元的地址为 00H~1FH。

在任一时刻，CPU 只能使用其中一组通用寄存器，称为当前通用寄存器组，具体可由程序状态寄存器 PSW 中 RS1、RS0 位的状态组合来确定。通用寄存器为 CPU 提供了就近存取数据的便利，提高了工作速度，也为编程提供了方便。

##### （2）位寻址区（20H~2FH）

内部 RAM 的 20H~2FH 共 16 个单元，计  $16 \times 8 = 128$  位，位地址为 00H~7FH。位寻址区既可作为一般的 RAM 区进行字节操作，也可对单元的每一位进行位操作，因此称为位寻址区，是存储空间的一部分。表 3.2 列出了位寻址区的位地址。

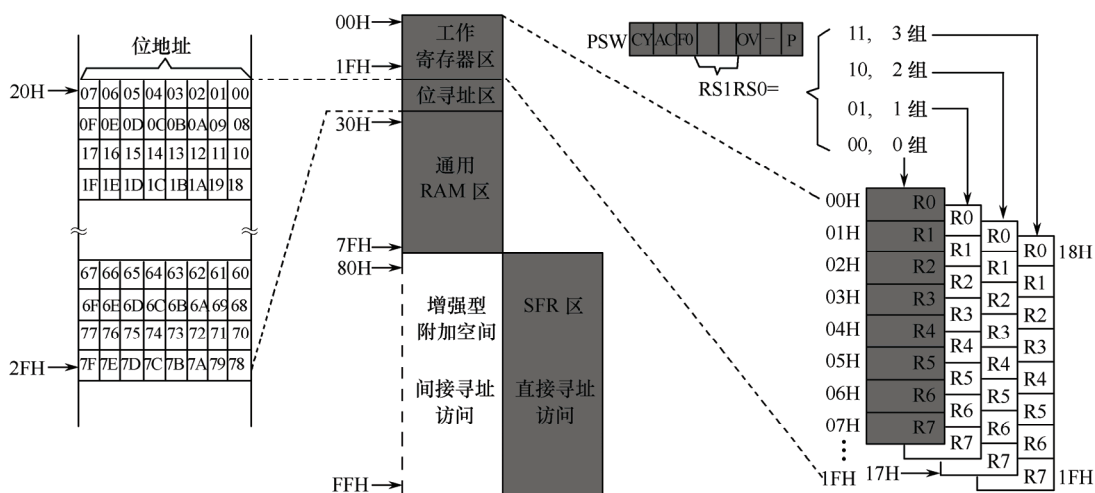


图 3.8 内部数据 RAM 详图

表 3.2 位寻址区的位地址

单元地址	MSB			位地址				LSB
2FH	7FH	7EH	7DH	7CH	7BH	7AH	79H	78H
2EH	77H	76H	75H	74H	73H	72H	71H	70H
2DH	6FH	6EH	6DH	6CH	6BH	6AH	69H	68H
2CH	67H	66H	65H	64H	63H	62H	61H	60H
2BH	5FH	5EH	5DH	5CH	5BH	5AH	59H	58H
2AH	57H	56H	55H	54H	53H	52H	51H	50H
29H	4FH	4EH	4DH	4CH	4BH	4AH	49H	48H
28H	47H	46H	45H	44H	43H	42H	41H	40H
27H	3FH	3EH	3DH	3CH	3BH	3AH	39H	38H
26H	37H	36H	35H	34H	33H	32H	31H	30H
25H	2FH	2EH	2DH	2CH	2BH	2AH	29H	28H
24H	27H	26H	25H	24H	23H	22H	21H	20H
23H	1FH	1EH	1DH	1CH	1BH	1AH	19H	18H
22H	17H	16H	15H	14H	13H	12H	11H	10H
21H	0FH	0EH	0DH	0CH	0BH	0AH	09H	08H
20H	07H	06H	05H	04H	03H	02H	01H	00H

注：MSB 为最高有效位；LSB 为最低有效位。

### (3) 用户 RAM 区 (30H~7FH)

所剩 80 个单元即为用户 RAM 区，单元地址为 30H~7FH，这些单元可以作为数据缓冲器使用。在一般应用中把堆栈设置在该区域中，栈顶的位置由堆栈指针 SP 指示。

对内部 RAM 低 128 单元的使用作几点说明：

① 80C51 的内部 RAM 00H~7FH 单元可采用直接寻址或间接寻址方式实现数据传送；

② 内部 RAM 20H~2FH 单元的位地址空间可实现位操作，当前工作寄存器组可通过软件对 PSW 中的 RS1、RS0 位的状态设置来选择。

## 2. 内部 RAM 高 128 单元

内部 RAM 高 128 单元是供给专用寄存器使用的，因此称之为专用寄存器区（也称为特殊功能寄存器区，SFR 区），单元地址为 80H~0FFH。80C51 共有 22 个专用寄存器，其中程序计数器 PC 在物理上是独立的，没有地址，故不可寻址，它不属于内部 RAM 的 SFR 区。其余的 21 个专用寄存器都属于内部 RAM 的 SFR 区，是可寻址的，它们的单元地址离散地分布于 80H~0FFH，见表 3.3。

表 3.3 21 个专用寄存器一览表

寄存器符号	地 址	寄存器名称	寄存器符号	地 址	寄存器名称
ACC	E0H	累加器	P3	B0H	I/O 口 3
B	F0H	B 寄存器	PCON	87H	电源控制及波特率选择寄存器
PSW	D0H	程序状态字	SCON	98H	串行口控制寄存器
SP	81H	堆栈指针	SBUF	99H	串行口数据缓冲寄存器
DPL	82H	数据指针低 8 位	TCON	88H	定时器控制寄存器
DPH	83H	数据指针高 8 位	TMOD	89H	定时器方式选择寄存器
IE	A8H	中断允许控制寄存器	TL0	8AH	定时器 0 低 8 位
IP	B8H	中断优先控制寄存器	TL1	8BH	定时器 1 低 8 位
P0	80H	I/O 口 0	TH0	8CH	定时器 0 高 8 位
P1	90H	I/O 口 1	TH1	8DH	定时器 1 高 8 位
P2	A0H	I/O 口 2			

下面介绍有关专用寄存器功能。

### （1）程序计数器 PC（Program Counter）

PC 是一个 16 位计数器，其内容为单片机将要执行的指令机器码所在存储单元的地址。PC 具有自动加 1 的功能，从而实现程序的顺序执行。由于 PC 是不可寻址的，因此用户无法对它直接进行读/写操作，但可以通过转移、调用、返回等指令改变其内容，以实现程序的转移。PC 的寻址范围为 64KB，即地址空间为 0000~0FFFFH。

### （2）累加器 ACC 或 A

累加器 ACC 是 8 位寄存器，是最常用的专用寄存器，功能强，地位重要。它既可存放操作数，又可存放运算的中间结果。80C51 系列单片机中许多指令的操作数来自累加器 ACC。累加器非常繁忙，是单片机的执行程序瓶颈，制约了单片机工作效率的提高，现在已经有些单片机用寄存器阵列来代替累加器 ACC。

### （3）寄存器 B

寄存器 B 是 8 位寄存器，主要用于乘、除运算。乘法运算时，B 中存放乘数，乘法操作后，高 8 位结果存于 B 寄存器中。除法运算时，B 中存放除数，除法操作后，余数存于寄存器 B 中。寄存器 B 也可作为一般的寄存器用。

### （4）程序状态字 PSW

程序状态字是 8 位寄存器，用于指示程序运行状态信息。其中有些位是根据程序执行结果由硬件自动设置的，而有些位可由用户通过指令方法设定。PSW 中各标志位名称及定义如下。

位序	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
位标志	CY	AC	F0	RS1	RS0	OV	—	P

CY——进（借）位标志位，也是位处理器的位累加器 C。在加减运算中，若操作结果的最高位有进位或有借位时，CY 由硬件自动置 1，否则清 0。在位操作中，CY 作为位累加器 C 使用，参与进行位传送、位与、位或等位操作。另外，某些控制转移类指令也会影响 CY 位状态（本书第 4 章讨论）。

AC——辅助进（借）位标志位。在加减运算中，当操作结果的低 4 位向高 4 位进位或借位时，此标志位由硬件自动置 1，否则清 0。

F0——用户标志位，由用户通过软件设定，用以控制程序转向。

RS1, RS0——寄存器组选择位。用于设定当前通用寄存器组的组号。通用寄存器组共有 4 组，其对应关系见表 3.4。

RS1、RS0 的状态由软件设置，被选中寄存器组即为当前通用寄存器组。

OV——溢出标志位。在带符号数（补码数）的加减运算中，OV=1 表示加减运算的结果超出了累加器 A 的 8 位符号数表示范围(-128~+127)，产生溢出，因此运算结果是错误的。OV=0，表示结果未超出 A 的符号数表示范围，运算结果正确。

乘法时，OV=1，表示结果大于 255，结果分别存在 A、B 寄存器中。OV=0，表示结果未超出 255，结果只存在 A 中。

除法时，OV=1，表示除数为 0。OV=0，表示除数不为 0。

P——奇偶标志位，执行结果中含“1”的奇偶状态，即是奇数个“1”，还是偶数个“1”。

(5) 数据指针 DPTR

数据指针 DPTR 为 16 位寄存器，它是 80C51 中唯一的一个 16 位寄存器。编程时，既可按 16 位寄存器使用，也可作为两个 8 位寄存器分开使用。DPH 为 DPTR 的高 8 位寄存器，DPL 为 DPTR 的低 8 位寄存器。DPTR 通常在访问外部数据存储器或 I/O 接口时作为地址指针使用，寻址范围为 64KB。

(6) 堆栈指针 SP

在微型计算机的内存中，都需要设置一个对数据实行“后进先出”操作的区域，这个区域称为堆栈。堆栈通常是存储器的一部分，为了保证堆栈区的数据能按“后进先出”的规则来操作，专门设置一个地址寄存器来管理，这个地址寄存器称为堆栈指针 SP，用于指示栈顶单元地址。

51 系列单片机中堆栈指针 SP 为 8 位寄存器。

在 51 系列单片机中，当数据存入堆栈时，堆栈指针将自动加 1 并将数据存入堆栈指针所指的存储单元，当需要从堆栈中取出数据时，首先将堆栈指针所指存储单元中的数据读取，然后自动将堆栈指针减 1。所以，堆栈指针始终指向堆栈中最后存入数据的那个单元，故称该单元为堆栈顶栈。由于数据存入堆栈时堆栈指针自动加 1（地址增大），所以称为向上生长型堆栈。

如图 3.9 所示。操作规程是：进栈操作，先将 SP 加 1，后写入数据；出栈操作，先读出数据，后将 SP 减 1。

51 系列单片机中，堆栈规定设在单片机的内部 RAM 中，同时在特殊功能寄存器中将 81H 设置为堆栈指针，即 SP=81H，81H 的内容指示了栈顶地址。

表 3.4 寄存器组选择位

RS1	RS0	寄存器组	R0~R7 地址
0	0	组 0	00~07H
0	1	组 1	08~0FH
1	0	组 2	10~17H
1	1	组 3	18~1FH

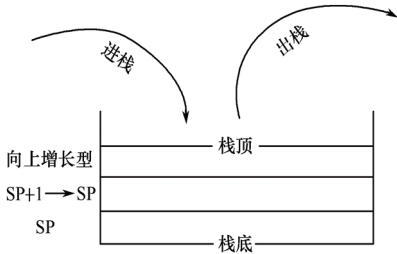


图 3.9 堆栈

### ① 堆栈的功用

堆栈的主要功用是保护断点和保护现场。

### ② 堆栈的设置

51 系列单片机系统复位时, (SP)=07H。由于 89C51 片内 RAM 区有限, 所以栈顶越小, 堆栈深度就越深。为便于通用 4 组工作寄存器组都能使用, 一般在系统初始化时使用 MOV SP,#30H 将栈顶设置在 30H 位置处。

### ③ 堆栈使用方式

堆栈使用方式有两种: 一种是自动方式, 在调用子程序或中断时, 返回地址自动进栈。程序返回时, 断点再自动弹回 PC。这种方式无须用户操作。

另一种是指令方式。进栈指令是 PUSH, 出栈指令是 POP。

### (7) 电源控制及波特率选择控制寄存器 PCON

PCON 为 8 位寄存器, 主要用于控制单片机工作于低功耗方式。80C51 系列单片机的低功耗方式有待机方式和掉电保护方式两种。待机方式和掉电保护方式都由专用寄存器 PCON 的有关位来控制。PCON 寄存器不可位寻址, 只能字节寻址。

位 序	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
位符号	SMOD	—	—	—	GF1	GF0	PD	IDL

● PD: 掉电保护位, (PD)=1, 进入掉电保护方式。

● IDL: 待机方式位, (IDL)=1, 进入待机方式。

### (8) 并行 I/O 端口 P0~P3

专用寄存器 P0、P1、P2、P3 分别是并行 I/O 口 P0~P3 中的数据锁存器。在 80C51 系列单片机中, 没有专门的 I/O 口操作指令, 而采用统一的 MOV 指令操作, 把 I/O 口当作一般的专用寄存器使用。

### (9) 串行数据缓冲器 SBUF

串行数据缓冲器 (SBUF) 是串行口的一个专用寄存器, 由一个发送缓冲器和一个接收缓冲器组成。两个缓冲器在物理上独立, 但公用一个地址 (99H)。SBUF 用来存放要发送的或已接收的数据。

### (10) 定时/计数器的专用寄存器

80C51 系列单片机中有两个 16 位的定时/计数器 T0 和 T1, 它们分别由两个独立的 8 位计数器组成, T0 由专用寄存器 TH0、TL0 组成, T1 由专用寄存器 TH1、TL1 组成。

### (11) 控制类的专用寄存器

IE、IP、TMOD、TCON、SCON 寄存器是中断系统、定时/计数器、串行口的控制寄存器, 包含控制位和状态位。控制位是编程写入的控制操作位。

对专用寄存器的字节寻址作如下几点说明:

① 21 个可字节寻址的专用寄存器离散分散在内部 RAM 高 128 单元, 其余的空闲单元为保留区, 无定义, 用户不能使用;

② 程序计数器 PC 是唯一不能寻址的专用寄存器, PC 不占用内部 RAM 单元, 它在物理上是独立的;

③ 对专用寄存器只能使用直接寻址方式, 在指令中可写成寄存器符号或单元地址形式。

### 3.4.2 专用寄存器的位寻址

在 21 个可寻址的专用寄存器中，有 11 个专用寄存器，它们的字节地址都能被 8 整除，可以进行位寻址，即可对这些专用寄存器单元的每一位进行位操作，每一位有固定的位地址。如表 3.5 列出了可位寻址的专用寄存器的每一位的位地址，表中字节地址带括号的专用寄存器不可位寻址。

表 3.5 可位寻址的专用寄存器的每一位的位地址

寄存器符号	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	字节地址
ACC	E7	E6	E5	E4	E3	E2	E1	E0	E0H
B	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1	F0	F0H
PSW	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	D0H
	CY	AC	F0	RS1	RS0	OV		P	
SP									(81H)
DPL									(82H)
DPH									(83H)
IE	AF	AE	AD	AC	AB	AA	A9	A8	A8H
	EA			ES	ET1	EX1	ET0	EX0	
IP	BF	BE	BD	BC	BB	BA	B9	B8	B8H
				PS	PT1	PX1	PT0	PX0	
P0	87	86	85	84	83	82	81	80	80H
	P0.7	P0.6	P0.5	P0.4	P0.3	P0.2	P0.1	P0.0	
P1	97	96	95	94	93	92	91	90	90H
	P1.7	P1.6	P1.5	P1.4	P1.3	P1.2	P1.1	P1.0	
P2	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	A0H
	P2.7	P2.6	P2.5	P2.4	P2.3	P2.2	P2.1	P2.0	
P3	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0	B0H
	P3.7	P3.6	P3.5	P3.4	P3.3	P3.2	P3.1	P3.0	
PCON	SMOD				GF1	GF0	PD	IDL	(87H)
SCON	9F	9E	9D	9C	9B	9A	99	98	98H
	SM0	SM1	SM2	REN	TB8	RB8	TI	RI	
SBUF									(99H)
TCON	8F	8E	8D	8C	8B	8A	89	88	88H
	TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0	
TMOD	GATE	C/ $\overline{T}$	M1	M0	GATE	C/ $\overline{T}$	M1	M0	(89H)
TL0									(8AH)
TL1									(8BH)
TH0									(8CH)
TH1									(8DH)

## 3.5 80C51 内部程序存储器（内部 ROM）

大多数 51 系列单片机内部都配置一定数量的程序存储器 ROM，如 80C51 芯片内有 4KB 掩模 ROM 存储单元，AT89C51 芯片内部配置了 4KB Flash ROM，它们的地址范围均为 0000H～0FFFH。ROM 可用来存放固定的程序或数据，如系统监控程序、常数表格等。



### 3.5.1 片内与片外程序存储器的选择

80C51 的程序计数 PC 是 16 位的计数器，所以能寻址 64KB ROM 的任何单元。

#### 1. $\overline{\text{EA}}$ 引脚接高电平

当  $\overline{\text{EA}}$  引脚接高电平时，对于基本型单片机，首先在片内程序存储器中取指令，当 PC 的内容超过 0FFFH 时，系统会自动转到片外的程序存储器中取指令，外部程序存储器的地址从 1000H 开始编址，如图 3.10 所示。

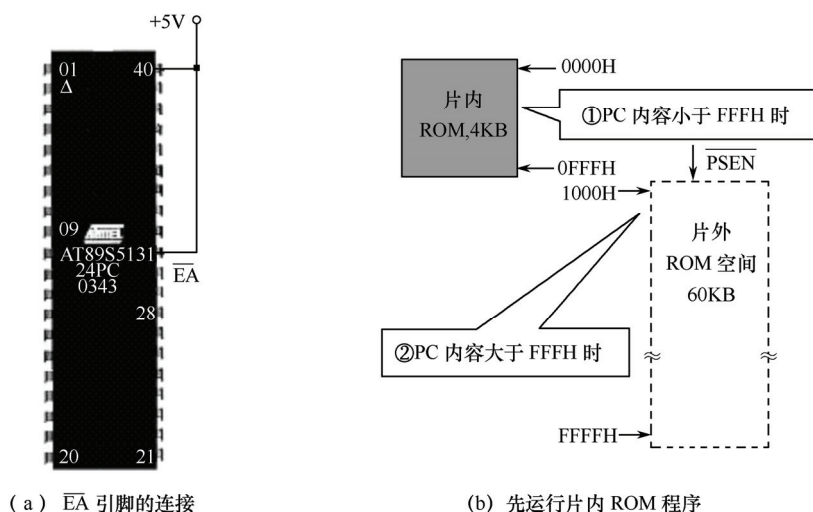


图 3.10  $\overline{\text{EA}}$  引脚接高电平

对于增强型单片机，首先在片内程序存储器中取指令，当 PC 的内容超过 1FFFH 时，系统才转到片外程序存储器中取指令。

#### 2. $\overline{\text{EA}}$ 引脚接低电平

当  $\overline{\text{EA}}$  引脚接低电平时，单片机自动转到片外程序存储器中取指令（无论片内是否有程序存储器），外部程序存储器的地址从 0000H 开始编址，如图 3.11 所示。

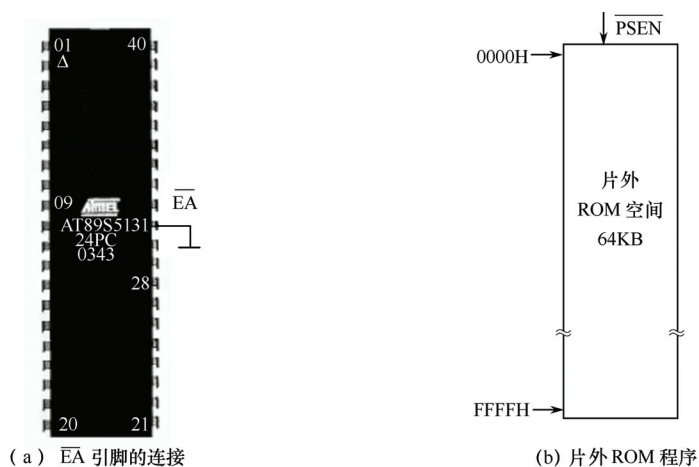


图 3.11  $\overline{\text{EA}}$  引脚接低电平

### 3.5.2 程序存储器的几个特殊单元

程序存储器低端的一些地址被固定地用于特定的入口地址，如图 3.12 所示。

其中一组特殊单元是 0000H~0002H。系统复位后，(PC)=0000H，单片机从 0000H 单元开始执行程序。如果不是从 0000H 开始，就要在这 3 个单元中存放一条无条件转移指令，以便转去执行指定的应用程序。

另外，在程序存储器中有各个中断源的入口地址，分配如下：

- 0003H~000AH——外部中断 0 中断地址区
- 000BH~0012H——定时/计数器 0 中断地址区
- 0013H~001AH——外部中断 1 中断地址区
- 001BH~0022H——定时/计数器 1 中断地址区
- 0023H~002AH——串行中断地址区

每个中断地址区有 8 个地址单元，可以存放中断服务程序，但 8 个单元通常难以存下一个完整的中断服务程序，因此往往需要在中断地址区首地址中存放一条无条件转移指令，转去中断服务程序真正的入口地址。

从 002BH 开始的单元才是用户可以随意使用的程序存储器。

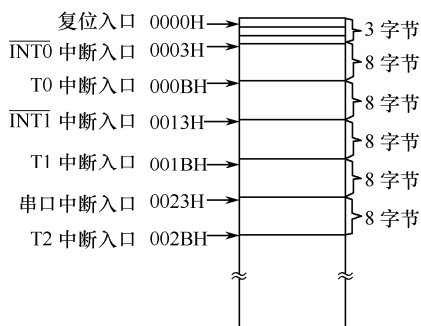


图 3.12 程序存储器低端的一些地址

## 3.6 80C51 单片机输入/输出（I/O）口

在 80C51 单片机中有 4 个双向的 8 位 I/O 口 P0~P3，在无片外存储器的系统中，这 4 个 I/O 口的每一位都可以作为准双向通用 I/O 口使用。在具有片外存储器的系统中，P0 口作为地址线的低 8 位以及双向数据总线，P2 口作为高 8 位地址线。这 4 个 I/O 口除了按字节寻址外，还可以按位寻址。

### 3.6.1 P0 口

图 3.13 给出了 P0 口的逻辑结构，它由一个锁存器、两个三态输入缓冲器、一个多路复用开关以及控制电路和驱动电路等组成。

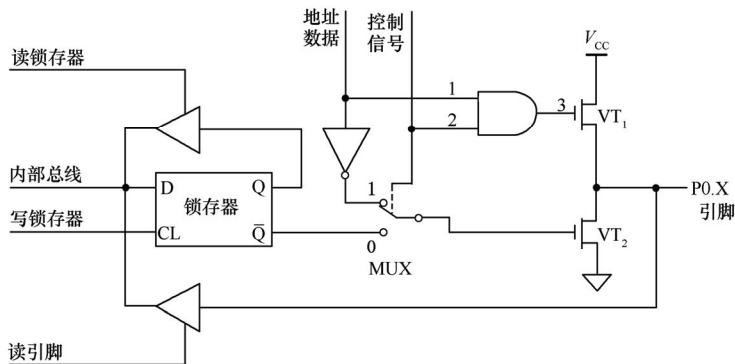


图 3.13 P0 口位结构

P0 口可以作为输入/输出口，在实际应用中通常作为地址/数据复用总线。

在访问外部存储器时，P0 口为真正的双向口。由图 3.13 可知，当 P0 口输出地址/数据信息时，此时控制信号为高电平“1”，模拟开关 MUX 将地址/数据线与场效应管 VT<sub>2</sub> 接通，同时与门输出有效，于是输出的地址/数据信息通过与门后将去驱动 VT<sub>1</sub>，同时通过反相器后驱动 VT<sub>2</sub>。若地址/数据为“1”，则 VT<sub>1</sub> 导通，VT<sub>2</sub> 截止，P0 口输出为“1”，反之 VT<sub>1</sub> 截止，VT<sub>2</sub> 导通，P0 口输出为“0”。当数据从 P0 口输入时，读引脚使三态缓冲器打开，端口上的数据经缓冲器后送到内部总线。

当 P0 口作为通用 I/O 口时，CPU 向端口输出数据，此时控制信号为“0”，MUX 开关与锁存器的反相端相连，写信号与触发器的时钟线相连，于是内部总线上的数据经反相后出现在 VT<sub>2</sub> 端，再经 VT<sub>2</sub> 反相后输出到 P0 端口，输出数据经过两次倒相后相位不变，但是由于 VT<sub>2</sub> 为漏极开路输出，故此时必须外接上拉电阻。

当 P0 口作输入时，由于信号加载在 VT<sub>2</sub> 上被送入三态缓冲器，若该接口此前刚锁存过数据“0”，则 VT<sub>2</sub> 是导通的，VT<sub>2</sub> 的输出被钳位在“0”电平，此时输入的“1”无法读入，所以当 P0 口作为通用 I/O 口时，在输入数据前，必须向端口写“1”，使 VT<sub>2</sub> 截止。不过当在访问外部存储器时，CPU 会自动向 P0 口写“1”。

有时需要先将端口的数据写入，经过修改后再输出到端口，若此时 P0 口的负载正好是晶体管的基极，并且其输出为“1”，这必然导致该引脚为低，若此时读取引脚信号，则会将刚输出的“1”误读为“0”，为了避免这类误读的错误，于是单片机还提供了读锁存器的功能。例如执行 INC P0 时，CPU 先读 P0 锁存器中数据，然后再执行加 1 操作，最后将结果送回 P0 口。这样单片机从结构上满足了“读—修改—写”这类操作的需要。

### 3.6.2 P1 口

P1 口是一个准双向口，通常作为 I/O 口使用，其位结构图如图 3.14 所示。由于在其输出端接有上拉电阻，故可以直接输出而无须外接上拉电阻。同 P0 口一样，当作输入时，必须先向对应的锁存器写“1”，使场效应管截止。同时值得一提的是，它可以被任何数字逻辑电路驱动，其中包括 TTL 电路、MOS 电路和 OC 电路。

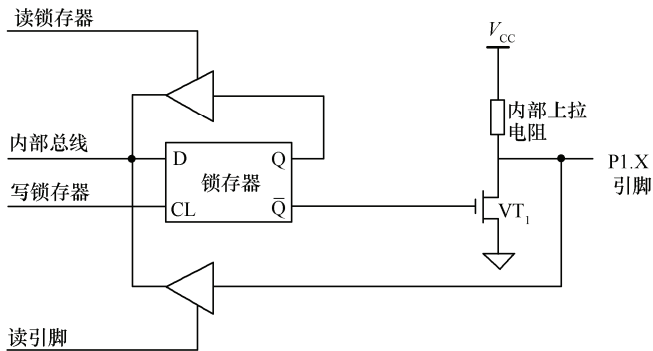


图 3.14 P1 口位结构

### 3.6.3 P2 口

P2 口位结构图如图 3.15 所示。P2 口为一个准双向口，其位结构与 P0 口相似。当系统外接片外存储器时，它输出高 8 位地址，此时开关在 CPU 的控制下接通地址信号。同时它还可作为通用 I/O 口使用，此时开关接通锁存器的 Q 端。对于 80C51 单片机来说，P2 口通常用作地址信号输出。

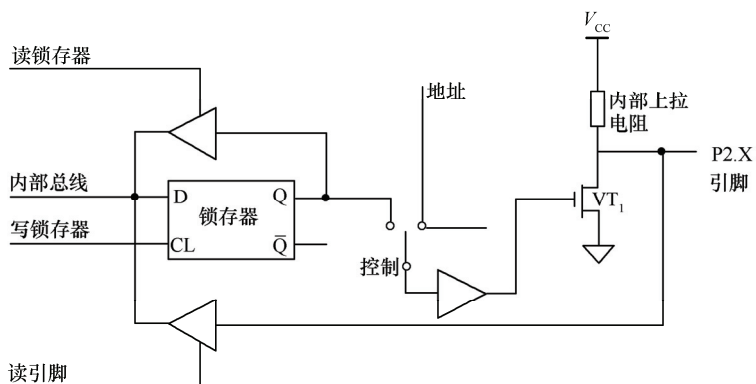


图 3.15 P2 口位结构

### 3.6.4 P3 口

P3 口的位结构图如图 3.16 所示。P3 口为双功能口，当 P3 口作为通用 I/O 口使用时，它为双向口，且每位都可定义为输入或输出，其工作原理同 P1 口类似。

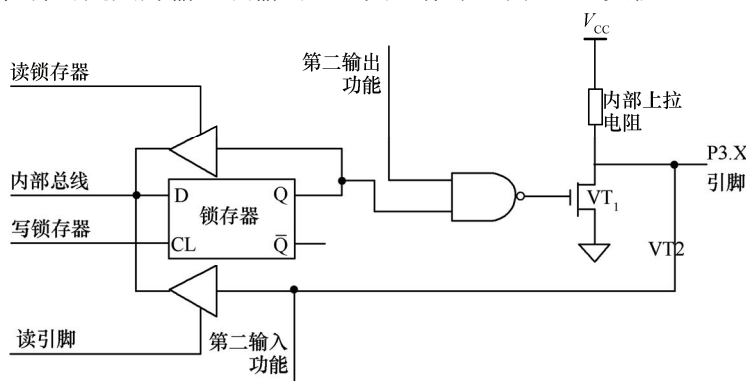


图 3.16 P3 口位结构

P3 口还具有第二功能，其引脚描述见表 3.6。对于输出而言，此时相应位的锁存器由 CPU 自动输出为“1”，有效输出第二功能。对于输入而言，无论该位是作为通用输入口还是作为第二功能输入口，相应的锁存器和选择输出功能端都置“1”，该工作在开机或复位时 CPU 自动完成。

80C51 系列单片机的并行 I/O 接口有以下应用特性。

① P0, P1, P2, P3 作为通用双向 I/O 口使用时，输入操作是读引脚状态；输出操作是对口的锁存器的写入操作，锁存器的状态立即反映到引脚上。

② P1, P2, P3 口作为输出口时，由于电路内部带上拉电阻，因此无须外接上拉电阻。

③ P0, P1, P2, P3 作为通用的输入口时，必须使电路中的锁存器写入高电平“1”。

表 3.6 P3 口特殊功能

口线	特殊功能	信号名称
P3.0	RxD	串行输入口
P3.1	TxD	串行输出口
P3.2	$\overline{\text{INT}}0$	外部中断 0 输入口
P3.3	$\overline{\text{INT}}1$	外部中断 1 输入口
P3.4	T0	定时器 0 外部输入口
P3.5	T1	定时器 1 外部输入口
P3.6	$\overline{\text{WR}}$	写选通输出口
P3.7	$\overline{\text{RD}}$	读选通输出口

④ I/O 口功能的自动识别。无论是 P0、P2 口的总线复用功能，还是 P3 口的第二功能复用，单片机会自动选择。

⑤ 两种读端口的方式，包括端口锁存器的读、改、写操作和读引脚的操作。在单片机中，有些指令是读端口锁存器的，如一些逻辑运算指令、置位/复位指令、条件转移指令以及将 I/O 口作为目的地址的操作指令；有些指令是读引脚的，如以 I/O 口作为源操作数的指令 MOV A,P1。

⑥ I/O 口的驱动特性。P0 口的每个 I/O 口可驱动 8 个 LS TTL 输入，而 P1、P2、P3 口的每个 I/O 口可驱动 4 个 LS TTL 输入。

### 3.7 单片机的工作方式

#### 3.7.1 复位及复位电路

在 80C51 中，最常见的复位电路为图 3.17 所示的上电复位电路，它能有效地实现上电复位和手动复位。RST 引脚是复位信号输入端，复位信号为高电平有效，其有效时间应持续 24 个振荡周期以上才能完成复位操作；若使用 6MHz 晶振，则需持续 4μs 以上才能完成复位操作。图 3.17 中，在通电瞬间，由于 RC 电路的充电过程，在 RST 端出现一定宽度的正脉冲，只要该正脉冲保持 10ms 以上，就能使单片机自动复位，在 6MHz 时钟时，通常  $C_R$  取 22μF， $R_1$  取 200Ω， $R_2$  取 1kΩ，这时能可靠地上电复位和手动复位。

CPU 在第二个机器周期内执行内部复位操作，以后每个机器周期重复一次，直至 RST 端电平变低。在单片机复位期间，ALE 和  $\overline{\text{PSEN}}$  信号都不产生。复位操作将对部分专用寄存器产生影响，复位后，这些内部寄存器状态见表 3.7。

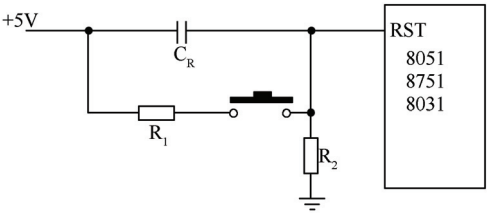


图 3.17 上电复位电路

表 3.7 部分专用寄存器复位状态

寄存器	值	寄存器	值
PC	0000H	ACC	00H
B	00H	PSW	00H
SP	07H	DPTR	0000H
P0~P3	0FFH	IP	×××0000
IE	0××0000	TMOD	00H
TCON	00H	TL0, TL1	00H
TH0, TH1	00H	SCON	00H
SBUF	不定	PCON	0×××0000

#### 3.7.2 时钟电路和时序

##### 1. 时钟电路

在 80C51 单片机片内有一个高增益的反相放大器，反相放大器的输入端为 XTAL1，输出端为 XTAL2，由该放大器构成的振荡电路和时钟电路一起构成了单片机的时钟方式。根据硬件电路的不同，单片机的时钟连接方式可分为内部时钟方式和外部时钟方式，如图 3.18 所示。

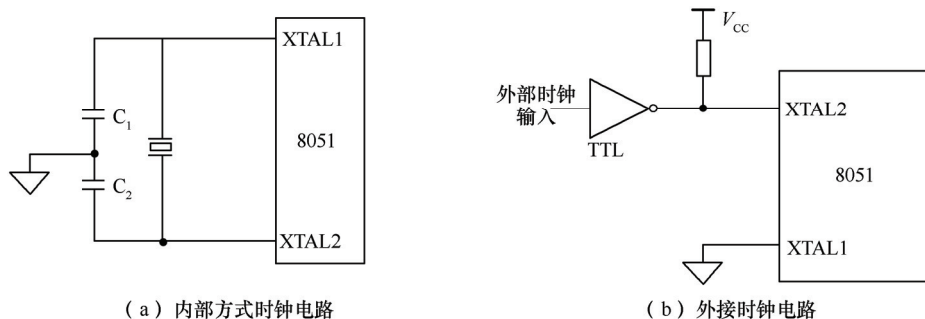


图 3.18 时钟电路

在内部方式时钟电路中，必须在 XTAL1 和 XTAL2 引脚两端跨接石英晶体振荡器和两个微调电容构成振荡电路，通常  $C_1$  和  $C_2$  一般取 30pF，晶振频率取值在 1.2~12MHz 之间。对于外接时钟电路，要求 XTAL1 接地，XTAL2 脚接外部时钟，对于外部时钟信号并无特殊要求，只要保证一定的脉冲宽度，时钟频率低于 12MHz 即可。

晶体振荡器的振荡信号从 XTAL2 端送入内部时钟电路，它将该振荡信号二分频，产生一个两相时钟信号 P1 和 P2 供单片机使用。P1 信号在每个状态的前半周期有效，P2 信号在每个状态的后半周期有效。CPU 就是以两相时钟 P1 和 P2 为基本节拍协调单片机各部分有效工作的。

## 2. 指令时序

单片机的基本操作周期称作机器周期，一个机器周期由 6 个状态组成，每个状态由两个时钟信号 P1 和 P2 构成，故一个机器周期可依次表示为 S1P1, S1P2, ..., S6P1, S6P2，即一个机器共有 12 个振荡脉冲。

### (1) 振荡周期

振荡源的周期或外部输入时钟的周期。

### (2) 状态周期

状态周期是振荡周期的 2 倍，分为 P1 节拍和 P2 节拍，通常在 P1 节拍完成算术逻辑操作，在 P2 节拍完成内部寄存器之间的传送操作。

### (3) 机器周期

一个机器周期由 6 个状态组成，如果把一条指令的执行过程分作几个基本操作，则将完成一个基本操作所需的时间称作机器周期。

### (4) 指令周期

指令周期即执行一条指令所占用的全部时间，通常为 1~4 个机器周期。

图 3.19 给出了 80C51 单片机的典型取指、执行时序。由图可知，在每个机器周期内，地址锁存信号 ALE 两次有效，一次在 S1P2 与 S2P1 之间，另一次在 S4P2 和 S5P1 之间。

从图 3.19 可以看出，对于单周期指令，当操作码被送入指令寄存器后，指令的执行从 S1P2 开始。若对于双字节单周期指令，则在同一机器周期的 S4 期间写入第 2 字节。如果是单字节单周期指令，则在 S4 期间仍然保持读操作，但所进行的读操作为无效操作，同时程序计数器 PC 并不加 1。

图 3.19 (a) 和 (b) 给出了单字节单周期和双字节单周期指令的时序，这些操作都在 S6P2 结束时完成指令操作。

图 3.19 (c) 给出了单字节双周期指令时序，在两个机器周期内进行了 4 次读操作，由于是单字节指令，故后面的三次读操作是无效的。

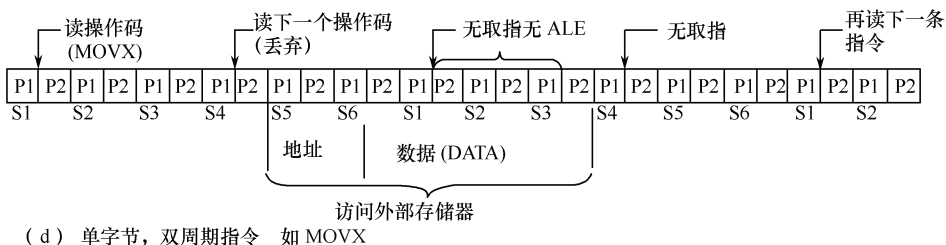
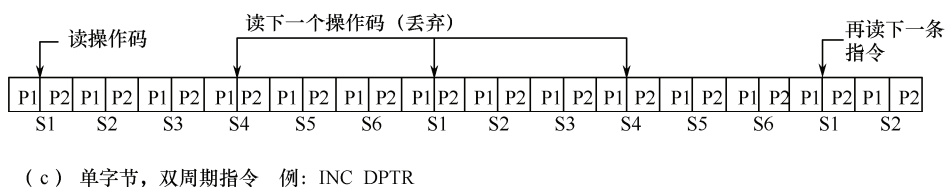
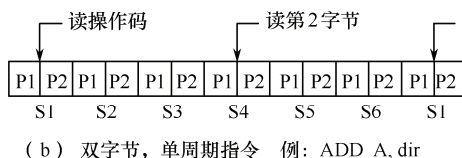
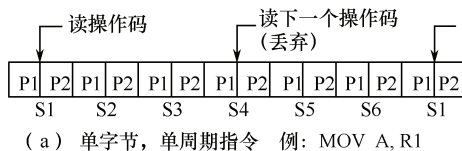
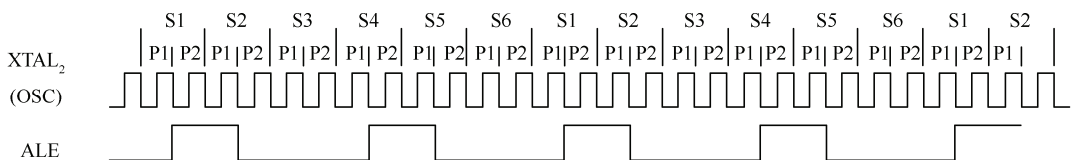


图 3.19 80C51 单片机取指、执行时序

图 3.19 (d) 给出了访问外部数据存储器指令 **MOVX** 的时序，它是一条单字节双周期指令。在执行 **MOVX** 指令期间，外部数据存储器被访问且选通时跳过两次取指操作，其中在第一个机器周期 **S5** 开始送出片外数据存储器的地址后，进行读、写数据，在此期间并无 **ALE** 信号，故第二周期不产生取指操作。

### 3.7.3 单片机的低功耗方式

通过设置电源控制寄存器 **PCON** 的相关位可以确定当前的低功耗方式。

#### 1. 待机方式

将 **PCON** 寄存器的 **IDL** 位置“1”，单片机则进入待机方式。此时，振荡器仍然处于工作状态，并且向中断逻辑、串行口和定时/计数器电路提供时钟，但是向 **CPU** 提供时钟的电路被断开，因此 **CPU** 停止工作。通常在待机方式下，单片机的中断仍然可以使用，这样可以通过中断触发方式退出待机模式。

#### 2. 掉电保护方式

将 **PCON** 寄存器的 **PD** 位置“1”，单片机则进入掉电保护方式。如果单片机检测到电源电

压过低，此时除进行信息保护外，还需将 PD 位被置“1”，使单片机进入掉电保护方式。此时，单片机停止工作，但是内部 RAM 中的数据仍被保存。如果单片机有备用电源如 80C51，待电源正常后，硬件复位信号维持 10ms 后使单片机退出掉电方式。

### 3.8 单片机执行指令的过程

单片机的工作过程就是运行程序的过程，而程序是指令的有序集合，因此运行程序就是按顺序一条一条执行指令的过程。指令的机器码一般由操作码和操作数地址两部分组成，操作码在前，操作数地址在后。操作码决定指令的操作类型（如加、减、乘、除等算术操作）。操作数地址指示了参加运算的操作数来自何处，操作数一般有两个（如加、减法），操作数地址简称地址码。指令的执行又可分为取出指令和执行指令两个步骤。例如要使单片机进行下列运算：

$08H+5BH=63H$

并将结果 63H 送单片机内部 RAM 35H 单元。步骤如下：

1. 编写汇编语言程序

```
MOV  A,#08H      ;将立即数 08H 送累加器 A,(A)=08H
ADD  A,#5BH      ;A 中的内容与立即数 5BH 相加,结果送 A,即 A←(A)+5BH
MOV  35H,A       ;结果送内部 RAM 35H 单元
```

2. 通过查指令表得出各指令的机器码

机器码	汇编语言源程序	指令功能
74H 08H	MOV A,#08H	立即数传送
24H 5BH	ADD A,#5BH	加法运算
F5H 35H	MOV 35H,A	数据传送

3. 将机器码存入程序存储器中

例如，从 8000H 程序存储器单元开始存放程序的机器码，如下表所示：

存储地址	ROM 存储单元内容	机器码
8000H	01110100	74H
8001H	00001000	08H
8002H	00100100	24H
8003H	01011011	5BH
8004H	11110101	F5H
8005H	00110101	35H

4. 程序执行过程

先赋值(PC)=8000H，以下为指令执行的步骤：

- (1) PC 送出当前地址 8000H，选中程序存储器 8000H 单元；
- (2) CPU 发出访问程序存储器信号，从 8000H 单元中取出第一条指令的操作码 74H；
- (3) PC 内容自动加 1，指向下一存储单元；
- (4) CPU 将操作码 74H 送内部指令译码器译码后已知是一条立即数送 A 的指令；
- (5) PC 送出当前地址 8001H，选中程序存储器 8001H 单元；



(6) CPU 再发出访问程序存储器信号, 从 8001H 单元中取出第一条指令的立即数 08H 并送 A;

(7) PC 内容自动加 1, 指向下一存储单元。

以上即为第一条指令的取指和执行指令过程。接下去 CPU 取出第二条指令码, 并完成加法运算后结果送 A, 最后是完成 A 中的内容送 35H 单元指令。每条指令的执行步骤与前面所述基本相同, 不再细述。

最后说明一下, 单片机的程序运行一般有两种方式。

① 连续执行方式: 这是程序运行最基本的方式, 即从 PC 指针开始, 连续执行程序, 直到遇到结束或暂停标志。在系统复位时, PC 总是指向 0000H 地址单元, 而实际的程序应允许从程序存储器的任意位置开始, 可通过执行若干种指令使 PC 指向程序的实际起始地址。单片机应用系统就是处于连续工作方式。

② 单步执行方式: 这种方式是指从程序的某地址开始, 启动一次只执行一条程序指令的运行方式, 主要用于调试程序。单步运行方式是利用单片机的中断结构实现的。将 80C51 的外部中断编程为外部电平触发方式, 并设置一个单步操作脉冲产生电路, 接入某个外部中断引脚, 单步操作键动作一次, 产生一个脉冲, 启动一次内部中断处理过程, CPU 执行一条程序指令, 这样就可以一步一步地进行单步操作。

## 本章小结

本章讲述了 80C51 单片机的基本结构和原理, 主要涉及以下内容:

(1) 以 80C51 为基核开发的 CHMOS 工艺单片机产品统称为 80C51 系列, 在功能上分为基本型和增强型两种。在片内程序存储器的配置上有掩模 ROM、EPROM 和 Flash、无片内程序寄存器等形式。

(2) 80C51 单片机主要是由微处理器、存储器、I/O 接口及三态总线构成。微处理器主要包括运算器、控制器、寄存器组几个部分; 内存储器由 RAM、ROM 或者 EPROM 等组成; I/O 接口作为 CPU 和外围设备的连接桥梁, 进行内外数据的传递; 数据总线 (DB)、地址总线 (AB)、控制总线 (CB)。

(3) 80C51 的存储器在物理上设计成程序存储器和数据存储器两种独立空间。片内程序存储器容量 4KB, 片内数据存储器 128B。

(4) 80C51 单片机的时钟信号有内部时钟方式和外部时钟方式两种。内部的各种操作都是以状态周期为时序基准。晶振信号二分频后形成两相错开的时钟信号 P1 和 P2, 十二分频后形成机器周期。一个机器周期包含 12 个晶振周期或者 6 个状态周期。指令的执行时间称为指令周期。

(5) 80C51 单片机有 4 个 8 位的并行 I/O 口: P0、P1、P2 和 P3。各接口均由锁存器、输出驱动器和输入缓冲器组成。P1 口是唯一的单功能口, 仅能用作通用的数据输入/输出接口。P3 口是双功能接口, 除具有数据输入/输出功能外, 每一条接口还有不同的第二功能。如果有外部程序存储器或者外部数据存储器时, P0 可作为低 8 位地址/数据总线, P2 口作为高 8 位地址总线。

## 思考题及习题

3.1 80C51 单片机的 P0~P3 口在通用 I/O 口时操作要注意哪些? P0~P3 口不做通用 I/O 口时是什么功能? 在使用上有何特点? P0~P3 驱动能力如何?

- 3.2 MCS-51 单片机运行出错或程序进入死循环，如何摆脱困境？
- 3.3 单片机的复位（RST）操作有几种方法？复位功能的主要作用是什么？
- 3.4 简述程序状态寄存器 PSW 中各位的含义。
- 3.5 80C51 单片机的当前工作寄存器组如何选择？
- 3.6 80C51 单片机的控制总线信号有哪些？各信号的作用如何？
- 3.7 8051 单片机中  $\overline{EA}$  引脚的作用是什么？
- 3.8 程序计数器 PC 的作用是什么？
- 3.9 堆栈有哪些功能？堆栈指针（SP）的作用是什么？在程序设计时，为什么要对 SP 重新赋值？
- 3.10 内部 RAM 低 128 单元划分为哪 3 个主要部分？说明各部分的使用特点。
- 3.11 简述 MCS-51 单片机存储区的划分。
- 3.12 MCS-51 基本型单片机的中断入口地址各为多少？
- 3.13 什么是指令周期、机器周期和状态周期？
- 3.14 已知一个 MCS-51 单片机系统使用 6MHz 的外部晶体振荡器，该单片机系统的状态周期与机器周期各为多少？

## 第4章 80C51的指令系统

指令是指示计算机执行某种操作的命令，计算机能识别执行的只能是二进制代码，以二进制代码来描述指令功能的语言，称为机器语言。由于机器语言不便于人们识别、记忆、理解和使用，因此便对每条机器语言指令用助记符号来形象表示，这就形成了汇编语言。

一条指令是机器语言的一个语句，包括操作码字段和操作数字段。一台计算机所具有的全部指令的集合，称为这台计算机的指令系统。不同的微处理器，其指令系统一般是不同的。

80C51 单片机指令系统共有 111 条指令，具有如下特点：

(1) 执行时间短：单机器周期指令（64 条）、双机器周期指令（45 条），而四机器周期的指令只有 2 条。

(2) 指令编码字节少：单字节指令（49 条）、双字节指令（45 条）和最长的三字节指令（只有 17 条）。

(3) 位操作指令丰富（有 17 条）。

为便于阅读指令，对 MCS-51 指令助记符的一些符号约定意义作以说明：

Rn —— 当前选定的工作寄存器 R0~R7；

Ri —— 当前选定的工作寄存器能作间接寻址的寄存器 R0 或 R1；

@ —— 间接寻址或变址寻址前缀，如 @ Ri、@DPTR；

#data —— 8 位立即数；

#data16 —— 16 位立即数；

Direct —— 片内 RAM 单元地址及 SFR 地址（8 位）；

addr11 —— 11 位目的地址；

addr16 —— 16 位目的地址；

rel —— 带符号的（补码）8 位偏移量，范围：-128~+127；

bit —— 片内 RAM 位地址、SFR 的位地址（可用符号名称表示）；

(×) —— 表示×地址单元或寄存器中的内容；

((×)) —— 表示以×单元或寄存器内容为地址的存储单元的内容；

/ —— 位操作数取反的前缀，表示对该位操作数取反；

→ —— 数据传送方向。

(×)<sub>RAM</sub> 或 (×)<sub>ROM</sub> —— 下角标表示取数区域。

### 4.1 指令的基本格式及常用符号

指令的汇编语言形式是用助记符来表示一条指令，其基本格式为：

操作码+操作数

操作码表示该指令将要做什么样的操作，操作数是该指令操作的对象，一般是操作所需要的数或所需要的数的存放地址。

### 4.1.1 指令的字节数

80C51 单片机指令有单字节指令、双字节指令和三字节指令 3 种。

#### (1) 单字节指令

单字节指令有 49 条，8 位二进制代码中既包含操作码的信息，也包含操作数的信息；或 8 位二进制代码中只包含操作码的信息，而操作数的信息被隐含了。

例如：MOV A,Rn

机器码为 1110 1xxx，其中 1110 1 为操作码，xxx 为操作数 n，若 Rn 为 R3，则 xxx=011，其机器码为 EBH。

例如：INC A，机器码为 04H，被隐含的操作数为累加器 A。

#### (2) 双字节指令

双字节指令有 45 条，机器码的第一个字节表示操作码，第二个字节表示操作数。

例如：MOV R2,#0F0H，机器码为 7A F0。

#### (3) 三字节指令

三字节指令有 17 条，第一字节表示操作码，另两个字节是操作数。

例如：ANL 30H,#66H，机器码为 53H 30H 66H。

### 4.1.2 指令的执行时间

MCS-51 系列单片机指令执行时间有单周期指令（64 条）、双周期指令（45 条）和四周期指令（2 条）。

### 4.1.3 汇编语言的语句结构

一般来讲，汇编语言的语句结构由 5 部分组成，即标号、操作助记符、目的操作数、源操作数和注释。一般格式如下：

[标号:] 操作助记符 [目的操作数][,源操作数][;注释]

例如：LOOP: MOV R3,#08H ;执行数据传送操作，将立即数 08H 送给寄存器 R3

(1) 方括号：[ ]表示该项是可选项，可有可无。

(2) 标号：是用户设定的地址符号，它代表该指令机器码存放在存储器中第一个字节的地址。标号必须以字母开头，其后跟 1~8 个字母或数字，并以“:”结尾。

(3) 操作助记符：是用该指令功能的英文缩写，它表明本条指令完成什么样的功能操作。任何一条指令都必须有该助记符项，不得省略。

(4) 目的操作数：提供操作的对象，并指出一个目标地址，表示操作结果将要存放的地址。

(5) 源操作数：指出的是一个源地址（或立即数），表示操作的对象或操作数来自何处。它与目的操作数之间要用“,”号隔开。

(6) 注释：在编写程序时，为了增加程序的可读性，由用户对该条指令或该段程序功能进行的说明。它以分号“;”开头，由于“;”以后部分计算机不予处理，故可以用中文、英文的某些符号来表示，但要注意在非注释部分的所有字符都必须是英文的，例如标点符号“,”、“:”只能用半角输入，而不能用全角输入。



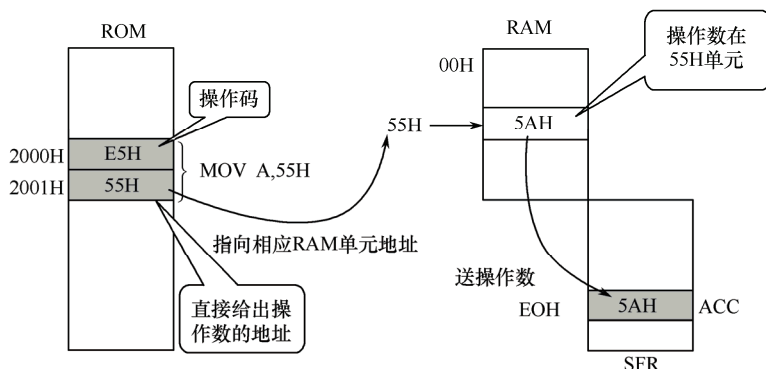


图 4.2 指令 MOV A,55H 执行示意图

### 4.2.3 寄存器寻址

由指令指出某一寄存器的内容作为操作数，这种寻址方式称为寄存器寻址。可以采用的寄存器有 R0~R7、累加器 A、寄存器 B、数据指针 DPTR 和布尔处理器的位累加器 C。

例如：MOV A,R0

指令中源操作数 R0 是寄存器寻址。该指令的功能是把工作寄存器 R0 中的内容传送到累加器 A 中，如 R0 中的内容为 44H，则执行该指令后 A 的内容也为 44H。

在 MCS-51 中寄存器寻址 Rn 按所选定的工作寄存器 R0~R7 进行操作，指令机器码的低 3 位的 8 种组合 000, 001, ..., 110, 111 分别对应所用的工作寄存器 R0, R1, ..., R6, R7。如：MOV A,Rn(n=0~7)，这 8 条指令对应的机器码分别为 E8H~EFH。

例如：MOV A,R0 ;将 R0 工作寄存器中的数据送到累加器 A 中

【例 4.3】若(R0)=44H，执行 1000H:MOV A,R0 后，(A)=44H，如图 4.3 所示。

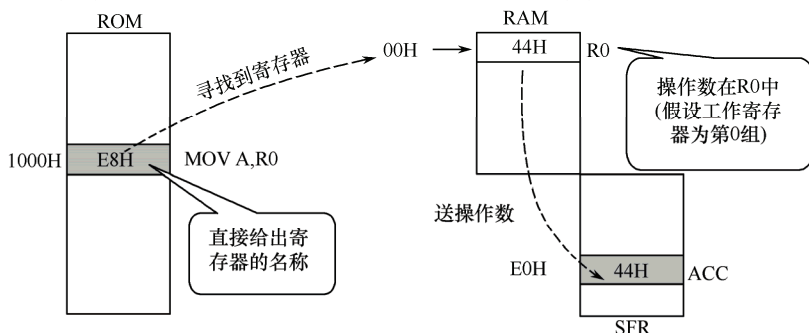


图 4.3 指令 MOV A,R0 执行示意图

### 4.2.4 寄存器间接寻址

指令中给出寄存器的名称，以寄存器的内容为地址再取一次，该数才是真正的操作数，这种寻址方式称为寄存器间接寻址。

在 80C51 系统中，可以用作间接寻址的寄存器有工作寄存器 R0 和 R1，以及数据指针寄存器 DPTR。

寄存器间接寻址对应的空间为：

- 片内 RAM（采用 @R0, @R1 或 SP）
- 片外 RAM（采用 @R0, @R1 或 @DPTR）

例如：MOV A,@R1，若 R1 中的内容为 80H，片内 RAM 地址为 80H 的单元中的内容为 2FH，则执行该指令后，片内 RAM 80H 单元的内容 2FH 被送到 A 中。

【例 4.4】若(R1)=44H，(44H)=2FH，执行 3000H: MOV A,@R1 后，(A)=2FH，如图 4.4 所示。

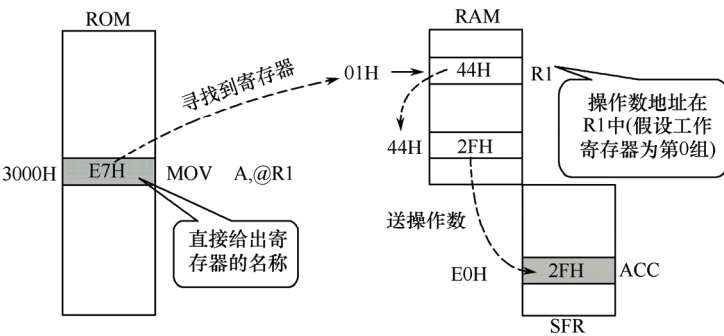


图 4.4 指令 MOV A,@R1 执行示意图

### 4.2.5 变址寻址

以 DPTR 或 PC 为基址寄存器，累加器 A 为变址寄存器。把两者内容相加，结果作为操作数的地址，这种寻址方式称为变址寻址。这类指令只限于访问 ROM，常用于查表操作和指令跳转。

如：MOVC A,@A+DPTR ;((A)+(DPTR))<sub>ROM</sub>→A  
 MOVC A,@A+PC ;(PC)+1→PC,((A)+(PC))<sub>ROM</sub>→A  
 JMP @A+DPTR ;(A)+(DPTR)→PC

【例 4.5】若(A)=0FH，(DPTR)= 2400H，执行 2000H:MOVC A,@A+DPTR 后，结果为 (240FH)<sub>外ROM</sub>→A，(A)= 88H，如图 4.5 所示。

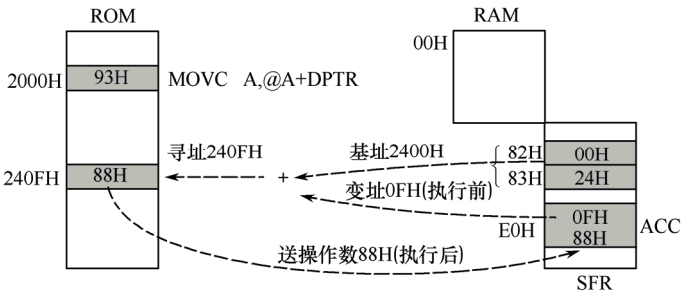


图 4.5 指令 MOVC A,@A+DPTR 执行示意图

### 4.2.6 相对寻址

相对寻址方式是以 PC 的内容作为基地址，加上指令中给定的偏移量，所得结果作为转移地址送 PC 寄存器。偏移量是 8 位带符号数的补码，真值在-128~+127 之间。以下一条指令的 PC 值为起点，转移访问范围在-128~+127。它用于访问程序存储器，常出现在相对转移指令中。

例如，2050H:JZ rel 是一条累加器 A 为零就转移的双字节指令，则执行该指令时的当前 PC 值即为 2052H，即当前 PC 值是对相对转移指令取指结束时的值。

偏移量 rel 是有符号的单字节数。以补码表示，其值的范围是-128~+127(00H~FFH)，负数表示从当前地址向前转移，正数表示从当前地址向后转移。所以，相对转移指令满足条件后，

转移的地址（目的地址）为：

目的地址=当前 PC 值+rel = 指令存储地址+指令字节数+rel

【例 4.6】若 rel 为 75H，PSW.7 为 1，执行指令 1000H：JC rel 后，程序将跳转到 1077H 单元取指令并执行，如图 4.6 所示。

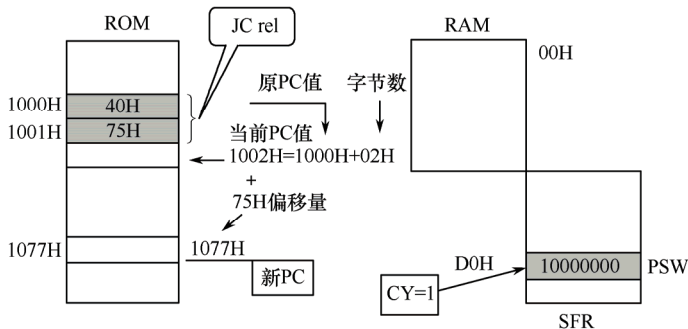


图 4.6 指令 JC rel 执行示意图

4.2.7 位寻址

从本质上来说，位寻址是直接寻址方式的一种形式。它的寻址对象是可寻址位空间中的一个位，而不是一个字节。由于在使用上存在一些特殊性，故将其单独列出。位寻址方式及相关的存储器空间见表 4.1。

表 4.1 寻址方式及相关的存储器空间

序号	寻址方式	寻址范围
1	寄存器寻址	R0~R7
		A、B、C (CY)、AB (双字节)、DPTR (双字节)、PC (双字节)
2	直接寻址	内部 RAM 低 128 字节
		特殊功能寄存器
		内部 RAM 位寻址区的 128 个位
		特殊功能寄存器中可寻址的位
3	寄存器间接寻址	内部数据存储器 RAM[@R0, @R1, SP (仅 PUSH, POP) ]
		内部数据存储器单元的低 4 位 (@R0, @R1)
		外部 RAM 或 I/O 口 (@R0, @R1, @DPTR)
4	立即寻址	ROM 程序存储器 (常数)
5	变址寻址	程序存储器 (@A+PC, @A+DPTR)
6	相对寻址	ROM (PC 当前值的-128~127 字节)
7	位寻址	可寻址位 (内部 RAM20H~2FH 单元中的位和部分 SFR 位)

位操作指令中的位地址有 4 种表示方法：

- ① 直接地址，如 00H；
- ② 点操作符，如 20H.0，PSW.5；
- ③ 位名称，如 F0；
- ④ 经伪指令定义过的字符名称，如 USER BIT PSW.5。



【例 4.7】位地址 00H 内容为 1，执行 3000H: MOV C,00H 后，位地址 PSW.7 的内容为 1，如图 4.7 所示。

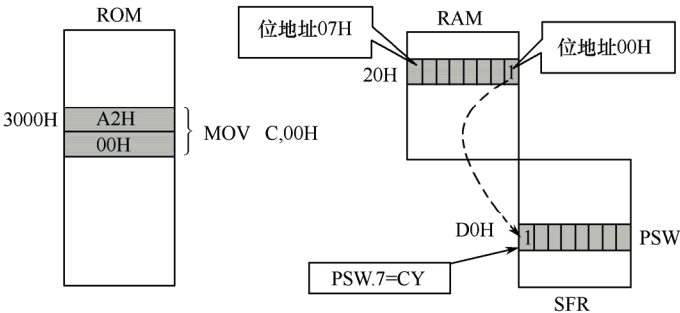


图 4.7 指令 MOV C,00H 执行示意图

### 4.3 数据传送类指令

数据传送是单片机最基本的操作。数据传送的一般功能是将源操作数传送到指令所指定的目的操作数，指令执行后，源操作数不变。数据传送类指令一般不影响标志位。数据传送类指令共 29 条，可以分成两大类。一是采用 MOV 操作符，称为一般传送指令，共有 16 条；二是采用非 MOV 操作符，称为特殊传送指令，共有 13 条。

#### 4.3.1 一般传送指令

一般传送指令的汇编指令格式为：

MOV <目的操作数>,<源操作数>

MOV 是传送指令的操作助记符。其功能是将源操作数传送到目的操作数，源操作数内容不变。该类指令的助记符、操作数、功能、字节数及执行时间（机器周期数），按目的操作数归类，在表 4.2 中列出。

表 4.2 一般数据传送指令（16 条）

操作码	目的	源	功能	字节数	机器周期数
MOV	A,	#data	data→ A	2	1
		direct	(direct) →A	2	1
		@Ri	((Ri)) <sub>内 RAM</sub> → A	1	1
		Rn	(Rn) →A	1	1
	Rn,	#data	data→ Rn	2	1
		direct	(direct) → Rn	2	2
		A	(A) →Rn	1	1
	direct,	#data	data →direct	3	2
		A	(A) →direct	2	1
		direct l	(direct l) →direct	3	2
		@Ri	((Ri)) <sub>内 RAM</sub> →direct	2	2
		Rn	(Rn) →direct	2	2

(续表)

操作码	目的	源	功能	字节数	机器周期数
	@Ri,	#data	data→(Ri)	2	1
		direct	(direct) →(Ri)	2	2
		A	(A) → (Ri)	1	1
	DPTR	#data16	data16→DPTR	3	2

## 1. 内部 8 位数据传送指令

内部 RAM 区是数据传送最活跃的区域, 8 位内部数据传送指令共有 15 条, 用于单片机内部的数据存储器和寄存器之间的数据传送。有立即寻址、直接寻址、寄存器寻址及寄存器间接寻址等寻址方式。该类指令的助记符、操作数、功能、字节数及执行时间(机器周期数), 按目的操作数归类, 在表 4.2 中列出。

(1) 以 A 为目的的操作数

MOV A,	Rn	;(Rn)→A
	direct	;(direct)→A
	@Ri	;((Ri))→A
	#data	;data→A

由于大多数数据的处理都要通过累加器完成, 以累加器 A 为目的的操作数的指令使用最为频繁。

【例 4.8】MOV A,@R1 ;((R1))→A

若(R1)=30H, (30H)=35H, 执行指令后, (A)=35H。

(2) 以 Rn 为目的的操作数

MOV Rn,	A	;(A)→Rn
	direct	;(direct)→Rn
	#data	;data→Rn

【例 4.9】MOV R0,#00H 后, (R0)=00H。

(3) 以 direct 为目的的操作数

MOV direct,	A	;(A)→direct
	Rn	;(Rn)→direct
	direct1	;(direct1)→direct
	@Ri	;((Ri))→direct
	#data	;data→direct

【例 4.10】若(R0)=66H, (66H)=13H, 执行指令 MOV 40H,@R0 后, (40H)=13H。

(4) 以 @Ri 为目的的操作数

MOV @Ri,	A	;(A)→(Ri)
	direct	;(direct)→(Ri)
	#data	;data→(Ri)

【例 4.11】若(R0)=3AH, (A)=2BH, 执行指令 MOV @R0,A 后, (3AH)=2BH。

## 2. 16 位数据传送指令

MOV DPTR,#data16 ;data16→DPTR

例如: 执行指令 MOV DPTR,#2030H 后, (DPH)=20H, (DPL)=30H。

该指令是 80C51 指令集中唯一的一条 16 位数传送指令, 其作用是将外部存储器某单元地址送到数据指针 DPTR。这个存储单元可以是外部 RAM 也可以是外部 ROM, 也可以是扩展的

片外接口地址。如果地址传送到 DPTR 后用到 MOVC 指令，则所送的一定是 ROM 地址；若用到 MOVX 指令，则所传送的一定是 RAM 地址或片外接口地址。

以上一般数据传送指令中，可以用 4 种目的字节为基础来构造 4 类指令，使用时请注意：

- 除 direct 外，源字节寻址与目的字节寻址方式是不相同的；
- Rn 寄存器寻址与寄存器间接寻址间不相互传送；
- 只有以累加器 A 作为目的操作数的指令，才可能影响奇偶标志 P。

4.3.2 特殊传送指令

特殊传送指令包括：ROM 查表、读/写外部 RAM、堆栈操作和交换指令，共 13 条，见表 4.3。

表 4.3 特殊传送指令（13 条）

操作助记符	目的	源	功能	字节数	机器周期数
MOVC (ROM 查表)	A,	@A+DPTR	$((A)+(DPTR))_{ROM} \rightarrow A$	1	2
		@A+PC	$((A)+(PC))_{ROM} \rightarrow A$		
MOVX (读外 RAM)	A,	@Ri	$((Ri))_{\text{外 RAM}} \rightarrow A$	1	2
		@DPTR	$((DPTR))_{\text{外 RAM}} \rightarrow A$		
MOVX (写外 RAM)	@Ri,	A	$(A) \rightarrow ((Ri))_{\text{外 RAM}}$	1	2
	@DPTR,		$(A) \rightarrow ((DPTR))_{\text{外 RAM}}$	1	2
PUSH	direct		$(\text{direct}) \rightarrow (\text{SP})$ 压栈	2	2
POP	direct		$((\text{SP})) \rightarrow \text{direct}$ 出栈	2	2
XCH (字节交换)	A,	Rn	$(A) \rightarrow Rn, (Rn) \rightarrow A$	1	1
		direct	$(A) \rightarrow \text{direct}, (\text{direct}) \rightarrow A$	2	
		@Ri	$((Ri)) \rightarrow A, (A) \rightarrow (Ri)$	1	
XCHD (半字节交换)	A,	@Ri	$((Ri))_{3-0} \rightarrow A_{3-0}$ $(A)_{3-0} \rightarrow (Ri)_{3-0}$	1	1
SWAP (自交换)	A		$(A_{7-4}) \rightarrow A_{3-0}$ $(A_{3-0}) \rightarrow A_{7-4}$	1	1

1. ROM 中常数读取指令

为了取出存放在程序存储器中的表格数据，80C51 单片机提供了两条查表指令，这两条指令的操作码助记符为“MOVC”（move code），表示操作对象是程序存储器。

```
MOVC  A,@A+PC          ;(PC)+1 → PC
                               ;((A)+(PC))ROM → A
MOVC  A,@A+DPTR        ;((A)+(DPTR))ROM → A
```

指令 MOVC A,@A+PC 以 PC 作为基址寄存器，A 作为变址寄存器，A 中的 8 位无符号数与 PC 内容（该指令的下一条指令的起始地址）相加后得到一个 16 位 ROM 地址，然后将该地址单元的内容取出送累加器 A。

指令 MOVC A, @A+DPTR 以 DPTR 为基址寄存器，A 作为变址寄存器，A 中的 8 位无符号数与 DPTR 内容相加后得到一个 16 位 ROM 地址，然后将该地址单元的内容取出送累加器 A。

【例 4.12】已知内存单元 20H 中有一个 0~9 范围内的数，用查表指令编出能查出该数平方值的程序。设平方表表头地址标号为 LAB。程序设计如下：

```

MOV A,20H
MOV DPTR,#LAB
MOVC A,@A+DPTR
...
LAB:DB 0,1,4,9,10H,19H...

```

若(20H)为3，执行 MOVC A,@A+DPTR 查表得9并存于A中。

【例 4.13】2000H:MOV A,#02H

2002H: MOVC A,@A+PC

由于 MOVC A,@A+PC 是单字节指令，下一条指令首地址为 2002H+1=2003H，执行 MOVC A,@A+PC 指令后，ROM 中 2005 单元内容将送到 A 中。

## 2. 片外 RAM 的读/写指令

使用 MOV 类指令，内部 RAM 单元内容可以有多种灵活的数据传送方式，而外部 RAM 数据的传送只能与 A 进行，且必须使用助记符为 MOVX 类的指令。

### (1) 读入累加器 A 的指令

```

MOVX A,@Ri          ;((Ri))外RAM→A
MOVX A,@DPTR         ;((DPTR))外RAM→A

```

MOVX A,@Ri 是使用 Ri 的间接寻址，只能传送外部 RAM 的 256 个单元的数据，指令执行时，由 Ri 中指定的低 8 位地址从 P0 口输出，若 RAM 的寻址需要高 8 位，则高 8 位地址由 P2 口提供。

MOVX A,@DPTR 是对整个 64KB 的 RAM 单元寻址。指令执行时，在 DPH 中的高 8 位地址由 P2 口输出，在 DPL 中的低 8 位地址由 P0 口分时输出。

【例 4.14】若(DPTR)=2000H，(2000H)<sub>外RAM</sub>=99H，执行 MOVX A,@DPTR 后，(A)=99H。

### (2) 从累加器 A 输出数据的指令

```

MOVX @Ri,A          ;(A)→(Ri)外RAM
MOVX @DPTR,A         ;(A)→(DPTR)外RAM

```

MOVX @Ri,A 指令以 Ri 为间址寄存器，将 A 的内容写入外部 RAM 由 Ri 所指定的单元，寻址空间为 256 字节的片外 RAM。指令执行时，由 Ri 所指定的低 8 位地址由 P0 口输出。

MOVX @DPTR,A 指令以 16 位 DPTR 为间址寄存器将 A 的内容写入外部 RAM DPTR 所指定的单元，寻址空间是整个 64KB 的片外 RAM。指令执行时，DPH 中高 8 位地址从 P2 口输出，DPL 中的低 8 位地址从 P0 口分时输出。

【例 4.15】若(DPTR)=1000H，(1000H)<sub>外RAM</sub>=22H，(A)=33H。

执行 MOVX @DPTR,A 后，(A)=33H，(1000H)<sub>外RAM</sub>=33H。

由于片外 RAM 数据的存取都要经过累加器 A，所以片外 RAM 单元之间的数据传送不能像片内 RAM 那样直接采用 MOV direct,direct1 来完成，而必须设计多条指令来完成。

【例 4.16】将外部 RAM 1000H 单元中的内容送入外部 RAM 2000H 单元中。

```

MOV DPTR,#1000H
MOVX A,@DPTR
MOV DPTR,#2000H
MOVX @DPTR,A

```

## 3. 堆栈操作指令

堆栈操作是通过指令来完成的。将数据送入堆栈的过程称为压入（或压栈）操作，而从堆栈中取出数据的过程称为弹出（或出栈）操作。

### (1) 压栈指令

PUSH direct ;(SP)+1→SP,(direct)→(SP)

压栈指令的功能是先将堆栈指针 SP 的内容加 1,然后将指令指定的直接寻址单元内容传送到栈顶单元。

【例 4.17】设(SP)=30H, (ACC)=20H, 执行下述指令:

PUSH ACC ;(SP)+1→SP,(ACC)→31H

结果为: (31H)=20H, (SP)=31H。

PUSH ACC 是用直接寻址方式寻址的, ACC=E0H, 与 PUSH E0H 效果一样, 若将 PUSH ACC 写成 PUSH A 就是寄存器寻址方式, 机器汇编时会提示该指令编写出错了。

### (2) 出栈指令

POP direct ;((SP))→direct,(SP)-1 →SP

出栈指令的功能是将当前堆栈指针 SP 所指示的单元的内容传送到该指令指定的单元中, 然后 SP 中的内容减 1。

【例 4.18】设(SP)=30H, (44 H)=20H, (30H)=88H, 执行 POP 44H 后, (44H)=88H, (SP)=2FH。

## 4. 数据交换指令

数据传送都是源操作数传送到目的操作数, 而源操作数不变, 数据流是单方向的; 数据交换类指令则是双方向的, 源和目的操作数都会发生改变。

XCH A,Rn ;(A)→Rn,(Rn)→A  
XCH A,direct ;(A)→direct,(direct)→A  
XCH A,@Ri ;((Ri))→A,(A)→(Ri)  
XCHD A,@Ri ;((Ri))<sub>3-0</sub>→A<sub>3-0</sub>, (A<sub>3-0</sub>)→(Ri)<sub>3-0</sub>  
SWAP A ;(A<sub>7-4</sub>)→A<sub>3-0</sub>, (A<sub>3-0</sub>)→A<sub>7-4</sub>

【例 4.19】若(R0)=20H, (A)=30H。执行指令 XCH A,R0 后, (A)=20H, (R0)=30H。

若(R0)=20H, (A)=30H, (20H)=88H, 执行指令 XCH A,@R0 后, (A)=88H, (R0)=20H, (20H)=30H。

## 4.4 算术运算类指令

算术操作指令共有 24 条, 可分为加、减、乘、除和 BCD 码调整指令 (见表 4.4), 除加 1、减 1 指令外, 算术运算指令的执行结果都将影响 CY、AC、OV 标志。

表 4.4 算术运算类指令

操作助记符	目的	源	功能	字节数	机器周期数
ADD (不带进位加)	A,	Rn	(A)+(Rn)→A	1	1
		direct	(A)+(direct)→A	2	
		@Ri	(A)+((Ri))→A	1	
		#data	(A)+(data)→A	2	
DA	A		十进制调整	1	1
ADDC (带进位加)	A,	Rn	(A)+(Rn)+(CY)→A	1	1
		direct	(A)+(direct)+(CY)→A	2	
		@Ri	(A)+((Ri))+(CY)→A	1	
		#data	(A)+(data)+(CY)→A	2	

(续表)

操作助记符	目的	源	功能	字节数	机器周期数
INC	A Rn direct @Ri DPTR		$(A)+1 \rightarrow A$	1	1
			$(Rn)+1 \rightarrow Rn$	1	
			$(direct)+1 \rightarrow direct$	2	
			$((Ri))+1 \rightarrow (Ri)$	1	
			$(DPTR)+1 \rightarrow DPTR$	1	2
SUBB (带借位减)	A, Rn direct @Ri #data		$(A)-(Rn)-(CY) \rightarrow A$	1	1
			$(A)-(direct)-(CY) \rightarrow A$	2	
			$(A)-((Ri))-(CY) \rightarrow A$	1	
			$(A)-(data)-(CY) \rightarrow A$	2	
DEC	A Rn direct @Ri		$(A)-1 \rightarrow A$	1	1
			$(Rn)-1 \rightarrow Rn$	1	
			$(direct)-1 \rightarrow direct$	2	
			$((Ri))-1 \rightarrow (Ri)$	1	
MUL	AB		$(A) \times (B) \rightarrow (B)(A)$	1	4
DIV	AB		$(A) \div (B) \rightarrow (A)_{\text{商}} (B)_{\text{余数}}$	1	4

#### 4.4.1 不带进位加法指令及 BCD 码加法调整指令

```

ADD  A,Rn          ;(A)+(Rn)→A
ADD  A,direct       ;(A)+(direct)→A
ADD  A,@Ri          ;(A)+((Ri))→A
ADD  A,#data        ;(A)+(data)→A
DA    A             ;BCD 码调整指令

```

前 4 条指令都是将累加器将 A 中的值与源操作数所指内容相加，最终结果回送到 A 中。无论是哪一条加法指令，参加运算的都是两个 8 位二进制数。微型计算机作加法时，做的是纯正的二进制数相加，但对用户来说，这些 8 位二进制数可能是无符号数（0~255），也可以当作有符号的补码，还可能是 BCD 码。为此微型计算机的设计者设计了若干个结果标志或调整指令供用户来使用，以便不同含义的二进制数通过这些加法指令来完成用户所需的加法操作。

##### （1）无符号数相加

例如，若  $A=11010011$ ， $R1=11101000$ ，执行指令 `ADD A,R1` 时，其和为  $110111011$ 。若相加的结果超过 8 位，则  $CY=1$ ，否则  $CY=0$ ，对用户来说，若  $CY=1$  表明刚才的无符号数 8 位加法运算结果有进位。

##### （2）有符号数相加

例如，若  $A=0111\ 0111(77H\ 或\ 119)$ ， $R1=00010010(12H\ 或\ 18)$ ，执行指令 `ADD A,R1` 时，其和为  $10001001(-77H\ 或\ -119)$ 。 $119+18=137$ ，而 8 位二进制补码所能表示的十进制数范围为  $-128 \sim 127$ ，明显 137 不能用 8 位二进制补码来表示，所以微型计算机中设计了  $OV$  标志，来告诉用户刚才的加法运算若为补码运算其结果是否超出所能表示的范围即是否溢出，刚才示例  $OV=1$ ，对用户来说，若  $OV=1$  表明刚才的补码加法运算结果不可用。

运算是否溢出的判断方法是：

- 两个正数相加（符号位都为 0），其和为负数（符号位为 1），则 OV=1；
- 两个负数相加（符号位都为 1），若和为正数（符号位为 0），则 OV=1。

### (3) BCD 码相加

例如，10011000B 即（98H）若为无符号二进制数，则其真值为十进制数 152；若为有符号二进制补码，则其真值为十进制数-104；若为 8421BCD 码，则其真值就是十进制数 98。

BCD 码在做加法运算时，会碰到这样一个问题，如 98H+03H，计算机结果 9BH，而正确的 BCD 码结果应该是 101H，如何解决呢？

8421BCD 码高 4 位与低 4 位之间是十进制数，而计算机在进行算术运算时，不管是什么码制，也不管什么原码还是补码，都是按无符号二进制来运算的，所以高 4 位与低 4 位之间是按 16 进制来运算的。所以两个 BCD 码算术操作后，要想得到正确的 BCD 码，必须对运算结果进行十进制调整。调整规则有两条：

- ① 若两个 BCD 数相加结果大于 1001，则要加 0110 进行调整；
- ② 若两个 BCD 数相加结果在本位上并不大于 1001，但产生了进位，相当于计算结果大于 9，则也要加 0110 进行调整；

BCD 码调整指令是一条专用的指令，用来实现 8421 BCD 码加法结果的调整，此指令为

DA A

这条指令对累加器 A 参与的 BCD 码加法运算结果进行十进制调整，使累加器 A 中的内容调整为两位压缩型 BCD 码的数，同时 PSW 中的 CY 表示结果的百位值。

使用时必须注意，它只能跟在加法指令之后。

DA A 调整步骤：若 A 中的低 4 位大于 9 或辅助进位标志 AC 为“1”，则低 4 位加 6；同样，A 中的高 4 位大于 9 或进位标志 CY 为“1”，高 4 位加 6。

【例 4.20】98H+03H，作加法后 A=9BH，CY=0，AC=0。

$$\begin{array}{r} 1001\ 1000 \\ +\ 0000\ 0011 \\ \hline 1001\ 1011 \end{array}$$

则执行 DA A 指令后，A 的低 4 位作加 6 调整，调整后高 4 位为 1010，故也需要进行调整：

$$\begin{array}{r} 1001\ 1011 \\ +\ 0000\ 0110\text{-----低 4 位调整} \\ \hline 1010\ 0001 \\ +\ 0110\ 0000\text{-----高 4 位调整} \\ \hline 10000\ 0001 \end{array}$$

结果为 A=01H，CY=1，相当于十进制数 101。

所以实际应用中，可设计如下程序：

```
MOV A,#98H      ;(98H)BCD=98
ADD A,03H        ;(03H)BCD=3
DA A             ;(CY)=1,(A)=01,得到十进制数 101
```

在 80C51 中没有十进制减法调整指令，因此要用适当的方法编写程序段来进行十进制减法运算的 BCD 码调整。

【例 4.21】若 A=49H，执行指令 ADD A,#6BH 的标志位结果是什么？

解 直接相加：

$$\begin{array}{r}
 01001001 \\
 + 01101011 \\
 \hline
 10110100
 \end{array}$$

由于两个正数相加结果为负数，表示出现了溢出，故  $OV=1$ ；同时可以看到进位标志  $CY=0$ 。在相加过程中，由于第 3 位相加产生对第 4 位的进位，故  $AC=1$ 。又因为相加后 A 中的 1 的数目为偶数，故  $P=0$ 。

所以，结果是：A=B4H（溢出）， $OV=1$ ， $CY=0$ ， $AC=1$ ， $P=0$ 。

### 4.4.2 带进位加法指令

ADDC A,Rn	;(A)+(Rn)+(CY)→A
ADDC A,direct	;(A)+(direct)+(CY)→A
ADDC A,@Ri	;(A)+((Ri))+(CY)→A
ADDC A,#data	;(A)+(data)+(CY)→A

这 4 条指令是将累加器 A 中的值与源操作数以及进位 CY 中的值相加，结果回送 A，常用于多字节数的加法运算中。需注意的是：这里的 CY 是指令开始执行时的进位标志值，而不是相加后产生的进位标志值。若 ADDC 执行前的  $CY=0$ ，则这 4 条指令的结果就和 ADD 加法指令一样。

### 4.4.3 加 1 指令

INC A	;(A)+1→A
INC Rn	;(Rn)+1→Rn
INC direct	;(direct)+1→direct
INC @Ri	;(Ri)+1→(Ri)
INC DPTR	;(DPTR)+1→DPTR

将指令中所指出操作数的内容加 1，加法仍按无符号二进制数进行。

只有 INC A 影响奇偶标志 P，其余指令不影响标志位。值得注意的是，若原来的内容为 0FFH，则加 1 后将产生溢出，使操作数的内容变成 00H，但不影响 CY。

### 4.4.4 带借位减法指令

SUBB A,Rn	;(A)-(Rn)-(CY)→A
SUBB A,direct	;(A)-(direct)-(CY)→A
SUBB A,@Ri	;(A)-((Ri))-(CY)→A
SUBB A,#data	;(A)-data-(CY)→A

这 4 条指令的操作是：将累加器 A 的内容与源操作数及进位标志相减，结果回送到累加器 A 中。

(1) 无符号数相减： $CY=1$ ，表明 D7 位有借位，否则  $CY=0$ ，从用户来说，若  $CY=1$  表明  $(A)<(\text{源操作数})$ 。

(2) 有符号数相减：若  $OV=1$ ，表明补码减法运算结果超出 8 位二进制数所能表示的范围，从用户角度来说， $OV=1$  表明刚才的补码减法运算结果不可用。

在判断是否溢出时，判断的规则为：

- 正数减正数或负数减负数都不可能溢出；
- 若一个正数减负数，差为负数，则  $OV=1$ ；
- 若一个负数减正数，差为正数，则  $OV=1$ 。

(3) 若要进行不带进位的减法运算，只要将 CY 清 0 即可。



减法指令影响 CY, AC, OV 和 P 标志。

【例 4.22】若 A=56H, 执行指令 SUBB A,#6AH 的结果是:

$$\begin{array}{r} 0101\ 0110 \\ -\ 0110\ 1010 \\ \hline 1110\ 1100 \end{array}$$

则 CY=1, AC=1, OV=0, P= 1。

### 4.4.5 减 1 指令

DEC A ;(A)-1→A  
DEC Rn ;(Rn)-1→Rn  
DEC direct ;(direct)-1→direct  
DEC @Ri ;((Ri))-1→(Ri)

将指令中所指出操作数的内容减 1 后再回送原单元。  
只有 DEC A 影响奇偶标志 P, 其余指令不影响标志位。

### 4.4.6 乘、除法指令

#### 1. 乘法指令

MUL AB ;(A)×(B)→(B)(A)

这条指令为单字节 4 个机器周期的指令, 完成单字节的乘法运算, 相乘按无符号数进行, 两个 8 位无符号数相乘结果为 16 位无符号数, 乘积的低 8 位存放在累加器 A 中, 高 8 位存放于寄存器 B 中。如果乘积超过 0FFH, 则溢出标志 OV 置 1, 否则清 0。进位标志 CY 总是被清 0, 奇偶标志仍然按 A 中 1 的奇偶性来确定。

【例 4.23】若(A)=31H, (B)=20H, 执行 MUL AB 后, (A)=20H, (B)=06H, OV=1, CY=0, P=1。

#### 2. 除法指令

DIV AB ;(A)÷(B)→(A)<sub>商</sub>……(B)<sub>余数</sub>

这条指令为单字节 4 个机器周期的指令, 完成单字节的除法运算, 相除按无符号数进行, 两个 8 位无符号数相除的商存放于累加器 A 中, 余数存放于寄存器 B 中。如果除数(B)=0, 则溢出标志 OV 置 1, 否则清 0。指令执行后, CY 总是被清 0, 奇偶标志仍然按 A 中 1 的奇偶性来确定。

【例 4.24】设(A)=0B9H, (B)=22H, 执行指令 DIV AB 后, 结果为(A)=05H, (B)=0FH, OV=0, CY=0, P=0。

## 4.5 逻辑运算类指令

逻辑运算指令共有 24 条, 包括逻辑与、或、异或、清零、取反、移位的指令, 见表 4.5。

表 4.5 逻辑运算指令

操作助记符	目的	源	功能	字节数	机器周期数
ANL (与)	A,	Rn	(A)∧(Rn)→A	1	1
		direct	(A)∧(direct)→A	2	
		@Ri	(A)∧((Ri))→A	1	
		#data	(A)∧data→A	2	

(续表)

操作助记符	目的	源	功能	字节数	机器周期数
	direct,	A	$(\text{direct}) \wedge (A) \rightarrow \text{direct}$	2	1
		#data	$(\text{direct}) \wedge \text{data} \rightarrow \text{direct}$	3	2
ORL (或)	A,	Rn	$(A) \vee (Rn) \rightarrow A$	1	1
		direct	$(A) \vee (\text{direct}) \rightarrow A$	2	
		@Ri	$(A) \vee ((Ri)) \rightarrow A$	1	
		#data	$(A) \vee \text{data} \rightarrow A$	2	
	direct,	A	$(\text{direct}) \vee (A) \rightarrow \text{direct}$	2	1
		#data	$(\text{direct}) \vee \text{data} \rightarrow \text{direct}$	3	2
XRL (异或)	A,	Rn	$(A) \oplus (Rn) \rightarrow A$	1	1
		direct	$(A) \oplus (\text{direct}) \rightarrow A$	2	
		@Ri	$(A) \oplus ((Ri)) \rightarrow A$	1	
		#data	$(A) \oplus \text{data} \rightarrow A$	2	
	direct,	A	$(\text{direct}) \oplus (A) \rightarrow \text{direct}$	2	1
		#data	$(\text{direct}) \oplus \text{data} \rightarrow \text{direct}$	3	2
CLR	A		$0 \rightarrow A$	1	1
CPL			$(\overline{A}) \rightarrow A$		
RL			$(An+1) \leftarrow (An), (A0) \leftarrow (A7)$		
RLC			$(An+1) \leftarrow (An),$ $(CY) \leftarrow (A7), (A0) \leftarrow (CY)$		
RR			$(An+1) \rightarrow (An), (A0) \rightarrow (A7)$		
RRC			$(An+1) \rightarrow (An),$ $(A0) \rightarrow (CY), (CY) \rightarrow (A7)$		

### 4.5.1 逻辑与指令

逻辑与运算指令有以下 6 条：

ANL A,Rn                   ; $(A) \wedge (Rn) \rightarrow A$   
 ANL A,direct               ; $(A) \wedge (\text{direct}) \rightarrow A$   
 ANL A,@Ri                 ; $(A) \wedge ((Ri)) \rightarrow A$   
 ANL A,#data               ; $(A) \wedge \text{data} \rightarrow A$   
 ANL direct,A               ; $(\text{direct}) \wedge (A) \rightarrow \text{direct}$   
 ANL direct,#data           ; $(\text{direct}) \wedge \text{data} \rightarrow \text{direct}$

逻辑与操作是两个操作数按位进行逻辑与运算，结果回送目的操作数。实用中常用逻辑与指令实现对目的操作数的某些位实现清 0（或称屏蔽）。

【例 4.25】(A)=D3H，执行指令 ANL A,#0FH 后，(A)=03H，即将 A 中的高 4 位清 0（或称屏蔽了 A 中的高 4 位），而 A 中的低 4 位保持不变。

### 4.5.2 逻辑或指令

逻辑或运算指令有以下 6 条：

ORL A,Rn	$;(A) \vee (Rn) \rightarrow A$
ORL A,direct	$;(A) \vee (direct) \rightarrow A$
ORL A,@Ri	$;(A) \vee ((Ri)) \rightarrow A$
ORL A,#data	$;(A) \vee data \rightarrow A$
ORL direct,A	$;(direct) \vee (A) \rightarrow direct$
ORL direct,#data	$;(direct) \vee data \rightarrow direct$

逻辑或操作是两个操作数按位进行逻辑或运算，结果回送目的操作数。实用中常用逻辑或指令实现对目的操作数的某些位实现置 1。

【例 4.26】(A)=53H，执行指令 ORL A,#80H 后，(A)=D3H，即将 A 中的最高位置 1，而 A 中的其他位保持不变。

### 4.5.3 逻辑异或指令

异或指令也有 6 条：

XRL A,Rn	$;(A) \oplus (Rn) \rightarrow A$
XRL A,direct	$;(A) \oplus (direct) \rightarrow A$
XRL A,@Ri	$;(A) \oplus ((Ri)) \rightarrow A$
XRL A,#data	$;(A) \oplus data \rightarrow A$
XRL direct,A	$;(direct) \oplus (A) \rightarrow direct$
XRL direct,#data	$;(direct) \oplus data \rightarrow direct$

逻辑异或操作是两个操作数按位进行逻辑异或运算，结果回送目的操作数。因为对于逻辑变量 A 来说， $A \oplus 0 = A$ ， $A \oplus 1 = \bar{A}$ ，所以实用中常用逻辑异或指令实现对目的操作数的某些位取反。

【例 4.27】(A)=56H，执行指令 XRL A,#0F0H 后，(A)=A6H，即将 A 中的高 4 位取反，而 A 中的低 4 位保持不变。

### 4.5.4 累加器清零及取反指令

清零及取反指令只有对累加器 A 才有。

CLR A	$;0 \rightarrow A$
CPL A	$;\bar{A} \rightarrow A$

80C51 指令系统中没有求补指令。若要进行求补操作，可按“求反加 1”来进行。

以上所有的逻辑运算指令，对 CY，AC 和 OV 标志都没有影响，只在涉及累加器 A 时，才会对奇偶标志 P 产生影响。

### 4.5.5 移位指令

80C51 中移位指令只有 4 条，且都是对累加器 A 进行，如图 4.8 所示。

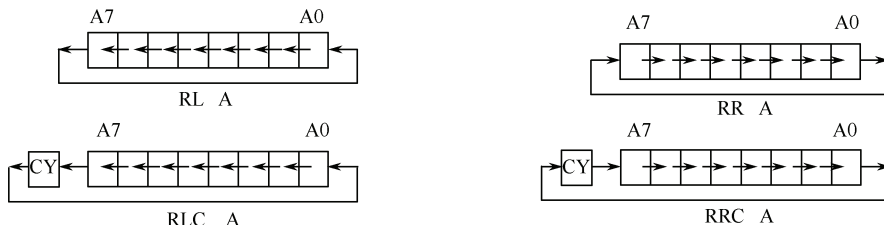


图 4.8 移位操作示意图

### 1. 循环左移

RL A ;累加器 A 的内容向左环移 1 位,  $(An+1) \leftarrow (An), (A0) \leftarrow (A7)$

### 2. 带进位的循环左移

RLC A ;累加器 A 的内容带进位标志位向左环移 1 位,  $(An+1) \leftarrow (An), (CY) \leftarrow (A7), (A0) \leftarrow (CY)$

### 3. 循环右移

RR A ;累加器 A 的内容向右环移 1 位,  $(An+1) \rightarrow (An), (A0) \rightarrow (A7)$

### 4. 带进位的循环右移

RRC A ;累加器 A 的内容带进位标志位向右环移 1 位,  $(An+1) \rightarrow (An), (A0) \rightarrow (CY), (CY) \rightarrow (A7)$

【例 4.28】设  $(A)=42H=66$ ，且  $CY=0$ ，则：

执行指令 RL A 后， $(A)=84H=132$ ，相当于  $(A) \times 2 \rightarrow A$ ；

执行指令 RR A 后， $(A)=21H=33$ ，相当于  $(A) \div 2 \rightarrow A$ ；

执行指令 RLC A 后， $(A)=84H=132$ ，相当于  $(A) \times 2 \rightarrow A$ ；

执行指令 RRC A 后， $(A)=21H=33$ ，相当于  $(A) \div 2 \rightarrow A$ 。

这组指令的功能是：对累加器 A 的内容进行简单的逻辑操作。除了带进位标志位的移位指令外，其他都不影响 CY，AC，OV 等标志。

## 4.6 控制转移类指令

通常情况下，微型计算机是顺序执行程序，但在有些情况下需要改变程序的走向，控制转移类指令就是可以改变程序运行走向的指令。80C51 共有 16 条这样的指令，包括无条件转移指令、条件转移指令以及子程序调用和返回指令，见表 4.6。

表 4.6 控制转移类指令

操作助记符	目的	源	功能	字节数	机器周期数
AJMP	addr11		$addr11 \rightarrow PC_{10-0}$	2	2
LJMP		addr16	$addr16 \rightarrow PC$	3	
SJMP		rel	$(PC) + 2 + rel \rightarrow PC$	2	
JMP		@A+DPTR	$(A) + (DPTR) \rightarrow PC$	1	
JZ	rel		$A=0, PC+2+rel \rightarrow PC$	2	2
JNZ	rel		$A \neq 0, PC+2+rel \rightarrow PC$		
CJNE (比较不等)	A,#data,rel A,direct,rel Rn,#data,rel @Ri,#data,rel		目的≠源: $(PC)+3+rel \rightarrow PC$ 目的=源: $(PC)+3 \rightarrow PC$	3	2
DJNZ (减 1 不为 0)	Rn,rel direct,rel		$(Rn)-1 \neq 0, (PC)+2+rel \rightarrow PC$ $(direct)-1 \neq 0, (PC)+3+rel \rightarrow PC$	2 3	2
ACALL	addr11		$addr11 \rightarrow PC_{10-0}$	2	2
LCALL	addr16		$addr16 \rightarrow PC$	3	
RET			$(SP) \rightarrow PC_{15-8}, (SP)-1 \rightarrow PC_{7-0}$	1	2
RETI			$(SP) \rightarrow PC_{15-8}, (SP)-1 \rightarrow PC_{7-0}$		

### 4.6.1 无条件转移指令

无条件转移指令是当程序执行到该条指令时，不需要任何条件，程序自动转移到该指令所指的目的地址去运行新的程序段。共有 4 条无条件转移指令。

#### 1. 短转移指令

AJMP addr11 ;(PC)+2→PC,addr11→PC<sub>10~0</sub>

addr11 是目的地址的低 11 位。在机器码中是 11 位二进制数，在实际编程中常写成：

AJMP K11；K11 是用户定义的目的地址，在译成机器码时，只取目的地址的低 11 位，编入该指令的机器码中。

该指令在运行时先将 PC+2 送给 PC，然后将 PC 的高 5 位作为新地址的高 5 位，目的地址的低 11 位作为新地址的低 11 位，这个新 PC 值就是目的地址，AJMP addr11 执行完后程序就到这个新 PC 所指的地方去运行。

由此可见，目标地址必须与 AJMP addr11 下一条指令地址的高 5 位相同，即在同一个 2KB 区域的页面内。很明显这是一条跳转范围为 2KB 内的无条件转移指令。

实用中一般写成 AJMP [地址标号]，若跳转范围超过 2KB 范围，汇编会提示出错，这时需要修改程序。

#### 【例 4.29】假设

2010 H: AJMP K11;

⋮

K11:MOV DPTR,#3333H ;(假设 K11=2592H)

查表得该指令的机器码格式为

a<sub>10</sub>a<sub>9</sub>a<sub>8</sub> 00001 a<sub>7</sub>a<sub>6</sub>a<sub>5</sub>a<sub>4</sub>a<sub>3</sub>a<sub>2</sub>a<sub>1</sub>a<sub>0</sub>

其中 a<sub>10</sub>~a<sub>0</sub> 为目的地址的低 11 位，本例中 2592H=0010 0101 1001 0010B，所以该机器码为 1010 0001 1001 0010B=A192H

#### 2. 相对转移指令

SJMP rel ;(PC)+2→PC, (PC)+rel→PC

该指令执行时，首先 PC 加 2，然后再把有符号偏移的补码 rel 加到 PC 上，得到目标地址。因此，转向的目标地址可以在 SJMP rel 指令的前 126B 到后 129B 之间。

#### 【例 4.30】程序中等待功能常由以下指令实现：

HERE: SJMP HERE

或 SJMP \$ ;"\$"是本条指令机器码第一个字节所在的存储器地址

该条指令的机器码为 80H FEH 补码，FEH 的真值是-2，所以新的目标地址是(PC+2)-2，仍是本条 SJMP 指令第一个字节的地址。程序进入死循环，通常用它来让程序停下来便于用户观察实验现象，常用于教学实验或程序调试等场合。

#### 3. 长转移指令

LJMP addr16 ;addr16→PC

LJMP 指令执行后，程序无条件地转向 16 位目标地址(addr16)处执行，该指令可以使程序从当前地址转移到 64KB 程序存储器地址空间的任意地址。

#### 4. 散转移指令

JMP @A+DPTR ;(A)+(DPTR)→PC

该指令是以数据指针 DPTR 的内容与累加器 A 的内容进行无符号相加，其结果作为新的

PC 值即目标地址，可以实现 64KB 范围内的转移。

该指令的特点是根据累加器 A 的值得到不同的目标地址，从而实现程序的多分支转移即分散转移。

**【例 4.31】**设累加器 A 中存放待处理命令的编号 (0~n;  $n \leq 127$ )，转移表首地址为 PGTB，则执行以下程序后，将根据 A 内命令编号值使程序转到相应的处理程序入口。

```
RL  A
MOV  DPTR,#PGTB      ;转移表首址→DPTR
JMP  @A+DPTR
PGTB: AJMP  PG0        ;A=0 转向命令 0 处理入口
      AJMP  PG1        ;A=1 转向命令 1 处理入口
      :
      AJMP  PGn        ;A=n 转向命令 n 处理入口
```

## 4.6.2 条件转移指令

条件转移指令是指在满足指定的条件时就进行转移，否则程序继续执行本指令的下一条指令。条件转移指令都是相对转移。

### 1. 判零转移指令

```
JZ  rel      ;若 A=0,则 PC+2+rel→PC(转移)
           ;若 A≠0,则 PC+2→PC(继续执行)
JNZ rel      ;若 A≠0,则 PC+2+rel→PC(转移)
           ;若 A=0,则 PC+2→PC(继续执行)
```

在 80C51 指令系统中没有零标志，这两条指令的功能是根据累加器 A 的内容为 0 和不为 0 进行检测并转移。指令执行时对标志位无影响。

JZ rel 是当累加器 A 的内容为 0，程序转向指定的目标地址，否则顺序执行。

JNZ rel 恰好反过来，是当累加器 A 的内容不为 0，程序转向指定的目标地址，否则顺序执行。

rel 为带符号的相对转移偏移量，所有指令中 rel 的计算方法如下：

源地址+字节数+rel=目标地址

rel=目标地址-源地址-字节数

源地址是转移指令的首地址，字节数是转移指令的字节数。

### 2. 比较条件转移指令

比较条件转移指令是对两个操作数进行比较，然后根据比较的结果来决定是否转移到目的地址。若两个操作数相等，则不转移，程序继续执行；若两个操作数不相等，则转移。比较条件转移指令共有 4 条。

```
CJNE A,#data,rel      ;(A)≠data,则(PC)+3+rel→PC(跳转)
                       ;(A)=data,则(PC)+3→PC(顺序执行)
CJNE A,direct,rel     ;(A)≠direct,则(PC)+3+rel→PC(跳转)
                       ;(A)=direct,则(PC)+3→PC(顺序执行)
CJNE Rn,#data,rel     ;(Rn)≠data,则(PC)+3+rel→PC(跳转)
                       ;(Rn)=data,则(PC)+3→PC(顺序执行)
CJNE @Ri,#data,rel    ;((Ri))≠data,则(PC)+3+rel→PC(跳转)
                       ;((Ri))=data,则(PC)+3→PC(顺序执行)
```

在助记符后面的第一项是目的操作数，第二项是源操作数，第三项是偏移量，它们执行时

完成的功能都一样。

(目的操作数)  $\neq$  (源操作数), 则(PC)+3+rel $\rightarrow$ PC (跳转);

(目的操作数) = (源操作数), 则(PC)+3 $\rightarrow$ PC (顺序执行)。

这4条指令执行时影响CY, 若目的操作数大于源操作数, 则CY=0, 否则CY=1, 为后续的分支创造条件。

(目的操作数) > (源操作数), 则CY=0;

(目的操作数) < (源操作数), 则CY=1。

80C51 指令系统中, 没有单独的比较指令, 但可以利用比较条件转移指令来弥补这一不足。

**【例 4.32】** 根据 A 的内容程序转移到不同的程序段入口去执行。

```
CJNE  A,#20H,NN
EE:           ;(A)=20H 时的处理程序入口
:
NN:JC  SS     ;(A)<20H 时程序转移到 SS
LL:           ;(A)>20H 时的处理程序入口
:
SS:
```

### 3. 减 1 非零转移指令

```
DJNZ  Rn,rel           ;(Rn)-1 $\rightarrow$ Rn
                        若 Rn=0,则(PC)+2 $\rightarrow$ PC(继续执行)
                        否则,(PC)+2+rel $\rightarrow$ PC(转移)

DJNZ  direct,rel       ;(direct)-1 $\rightarrow$ direct
                        若(direct)=0,则(PC)+3 $\rightarrow$ PC(继续执行)
                        否则,(PC)+3+rel $\rightarrow$ PC(转移)
```

它将第一个操作数的值减 1, 并保存结果, 然后判断这个值是否等于 0。如果等于 0, 就往下执行; 如果不等于 0, 就转移到第二个操作数所指定的地方。

这组指令对于构成循环程序十分有用, 可以指定任何个工作寄存器或者内部 RAM 单元为计数器。对计数器赋以初值以后, 就可以利用上述指令, 实现计数循环操作。

```
【例 4.33】  MOV  23H,#05H
                CLR  A
LOOP:  ADD  A,23H
        DJNZ 23H,LOOP
        SJMP $
```

上述程序段的执行过程是: 5+4+3+2+1=15。

将 23H 单元中的数连续相加, 存至 A 中, 每加一次, 23H 单元中的数值减 1, 直至(23H)减到 0, 共加(23H)次。

## 4.6.3 调用及返回指令

在程序设计时, 对经常使用的具有一定功能的程序段可以设计为子程序, 在需要使用时可以调用它, 这样可以使程序的结构更加清楚, 同时减少重复指令所占的内存空间, 实现程序的模块化设计。

在调用子程序时, 80C51 系统有专门的子程序调用指令。子程序调用时, 必须要中断原有的指令执行顺序, 转移到子程序的入口地址去执行子程序。在子程序执行完毕后, 又要返回到原有程序中断的位置, 继续往下执行。所以这个断点位置(地址)要保存起来, 一般都是放在

堆栈中保存。我们把返回到原有程序继续执行的位置称为程序断点，也就是子程序调用指令的下一条指令的地址。

### 1. 调用指令

MCS-51 中有两条子程序调用指令：

```
ACALL  addr11      ;(PC)+2→PC
                  ;(SP)+1→SP,(PC7-0)→(SP)(断点低 8 位压入堆栈)
                  ;(SP)+1→SP,(PC15-8)→(SP)(断点高 8 位压入堆栈)
                  ;addr11→PC10-0

LCALL  addr16      ;(PC)+3→PC
                  ;(SP)+1→SP,(PC7-0)→(SP)(断点低 8 位压入堆栈)
                  ;(SP)+1→SP,(PC15-8)→(SP)(断点高 8 位压入堆栈)
                  ;addr16→PC
```

ACALL addr11 是短调用指令，同样 addr11 是被调用子程序首地址的低 11 位，编程时常用标号来表示，同 AJMP 指令一样，被调用的子程序的起始地址必须与 ACALL 下面指令的第一个字节在同一个 2KB 区域的页面内。

LCALL addr16 是长调用指令，被调用的子程序可以在 64KB 范围内的任何位置。

**【例 4.34】** 设 (SP)=60H，标号 K11 的值为 8000H，标号 AAS 的值为 8200H，在执行指令：

```
K11: ACALL  AAS
```

后结果为(SP)=62H，(61H)=02H，(62H)=80H，(PC)=8200H。

### 2. 返回指令

#### (1) 子程序返回指令

```
RET      ;(SP)→PC15-8, (SP)-1→SP
         ;(SP)→PC7-0, (SP)-1→SP
```

先把栈顶的一个数弹出赋给 PC 的高 8 位，然后调整栈顶位置，再把栈顶的一个数弹出赋给 PC 的低 8 位，再次调整栈顶位置，这个给 PC 赋值的顺序与子程序调用时将断点压栈的顺序恰好相反，但恰好实现断点的正确返回，这正是堆栈“先进后出”组织机制实现的功能之一。所以 RET 应写在子程序的末尾，用以恢复断点，使程序返回主程序继续执行。

#### (2) 中断返回指令

还有一条返回指令是从中断服务子程序返回的指令，称为中断返回指令。

```
RETI     ;(SP)→PC15-8, (SP)-1→SP
         ;(SP)→PC7-0, (SP)-1→SP
```

基本功能与子程序返回指令 RET 相同，除此以外，它还要清除 80C51 单片机内部的中断优先级状态触发器，使得已申请的同级和较低级中断申请可以得到响应。

RETI 应设计在中断服务子程序的最后，用以恢复断点和清除中断优先级状态触发器。

## 4.7 布尔变量操作指令

布尔变量即开关量，是以位为基本单位来进行运算和操作的。80C51 系统具有对位变量的处理能力，它有自己的累加器 CY，称为位累加器，有自己的位存储空间，还有自己独立的运算处理硬件系统和软件指令系统，共有 17 条。这一特殊的位处理能力使得单片机在工业控制系统中有着广泛的应用。布尔变量操作指令见表 4.7。



表 4.7 布尔变量操作指令

操作助记符	目的	源	功能	字节数	机器周期数
MOV		C,bit	(bit)→CY	2	1
		bit, C	(CY)→bit	2	2
CLR		C	0→CY	1	1
		bit	0→bit	2	
SETB		C	1→CY	1	1
		bit	1→bit	2	
ANL		C,bit	(CY)^(bit) →CY	2	2
		C,/bit	(CY)^(bit) →CY		
ORL		C,bit	(CY) (bit) →CY	2	2
		C,/bit	(CY) (bit) →CY		
CPL		C	/(CY)→CY	1	1
		bit	/(bit)→bit	2	
JC		rel	(PC)+2+rel→PC	2	2
JNC			(PC)+2+rel→PC		
JB		bit,rel	(PC)+3+rel→PC	3	2
JBC			(PC)+3+rel→PC 且(bit)=0		
JNB			(PC)+3+rel→PC		
NOP			空操作	1	1

位存储空间主要有：

- 内部 RAM 中的位寻址区，即 20H～2FH 中连续的 128 位，位地址 00H～7FH；
- 特殊功能寄存器 SFR 中可以进行位寻址的各位。

#### 4.7.1 位传送指令

```
MOV C,bit      ;(bit)→CY
MOV bit,C      ;(CY)→bit
```

位传送指令只有 2 条，为便于书写，在指令中 CY 直接用 C 来表示。

【例 4.35】30H 位的内容传送到 20H 位。

```
MOV C,30H      ;(30H)→CY
MOV 20H,C      ;(CY)→(20H)
```

#### 4.7.2 位置位指令

位置位指令共有 4 条。

```
CLR C          ;0→CY
CLR bit        ;0→bit
SETB C         ;1→CY
SETB bit       ;1→bit
```

【例 4.36】若(P1)=0101 1101B，执行指令：

CLR P1.4

SETB P1.7

后，结果为：(P1)=1100 1101B。

### 4.7.3 位运算指令

位运算包括位逻辑的与、或、非 3 种。都是以位累加器 CY 为一个操作数，另一个位地址内容作为第二个操作数，逻辑运算的结果仍送回 CY。

#### 1. 逻辑与

ANL C,bit ;(CY)^(bit) →CY

ANL C,/bit ;(CY)^(bit) →CY

(bit)前的斜杠表示对(bit)内容取反，直接寻址位取反后用作源操作数，但不改变源操作数原来的值。

【例 4.37】ANL C,P1.0 执行前 P1.0 为 0，CY 为 1，则指令执行后 C 为 1，而 P1.0 仍为 0。

#### 2. 逻辑或

ORL C,bit ;(CY)^(bit) →CY

ORL C,/bit ;(CY)^(bit) →CY

例如，若(P1)=0011 1100B，(CY)=0。执行指令 ORL C,P1.3 后，结果为：P1 内容不变，而(CY)=1。

#### 3. 逻辑非

CPL C ;/(CY)→CY

CPL bit ;/(bit)→bit

这组指令对操作数所指出的位的内容进行取反。

80C51 指令系统中没有位异或指令，位异或操作可用若干条位操作指令来实现。

### 4.7.4 位控制转移指令

位控制转移指令都是条件转移指令。它是以 CY 或者位地址 bit 的内容作为是否转移的条件。

#### 1. 以 CY 内容为条件的转移指令

JC rel ;若(CY)=1,(PC)+2+rel→PC(转移)

(CY)=0,(PC)+2→PC(顺序执行)

JNC rel ;若(CY)=0,(PC)+2+rel→PC(转移)

(CY)=1,(PC)+2→PC(顺序执行)

这两条指令的功能是对进位标志位 CY 进行检测，当(CY)=1（第一条指令）或(CY)=0（第二条指令）时，程序转向 PC 当前值与 rel 之和的目标地址去执行，否则程序将顺序执行。JC rel 指令适用于“<”时跳转的判别，JNC rel 指令适用于“a≥b”时跳转的判别。

例如，假设 a 已传送到累加器 A 中，b 存放在寄存器 B 中，当 a<b 时，跳转到 KL1。

CLR C ;清进位标志 CY,以便使用带进位减法指令

SUBB A,B ;(A)-(B)-CY→A

JC KL1 ;当 CY 为 1,即(A)<(B)也就是 a<b 时,跳转到 KL1

#### 2. 以位地址内容为条件的转移指令

JB bit,rel ;若(bit)=1,(PC)+3+rel→PC(转移)

	;若(bit)=0,(PC)+3→PC(顺序执行)
JBC bit,rel	;若(bit)=1,(PC)+3+rel→PC(转移)并且(bit)=0
	;若(bit)=0,(PC)+3→PC(顺序执行)
JNB bit,rel	;若(bit)=0,(PC)+3+rel→PC(转移)
	;若(bit)=1,(PC)+3→PC(顺序执行)

这 3 条指令都是对指定位 bit 进行检测, 当(bit)=1 (第一和第二条指令) 或(bit)=0 (第三条指令), 程序跳转执行, 否则程序将顺序执行。对于第二条指令, 当条件满足时 (指定位为 1), 还具有将该指定位清 0 的功能。

此外还有一条空操作指令

NOP ;(PC)+1→PC

空操作指令 CPU 不作任何操作, 而只消耗这条指令执行所需要的一个机器周期的时间。因此, 这条指令可用于产生短时间的延迟、调整等情况。

以上介绍了 80C51 的指令系统。理解和掌握指令系统, 是能否很好地使用微型计算机和单片机的一个重要前提。

## 本章小结

(1) 寻址方式就是告诉你如何去寻找操作数, 指令由操作码和操作数构成, 操作码指明该指令要完成什么样的操作, 操作数指出该操作的对象。

(2) 80C51 指令系统有 7 种寻址方式, 即寄存器寻址、直接寻址、寄存器间接寻址、立即寻址、变址寻址、相对寻址、位寻址, 共有 111 条指令。这 111 条指令中:

从执行时间上来分有单周期指令 64 条、双周期指令 45 条和四周期指令 2 条。从指令的字节数来分有单字节指令 49 条、双字节指令 45 条和三字节指令 17 条。

从功能上来分有数据传送类指令 29 条、算术运算类指令 24 条、逻辑运算类指令 24 条、控制转移类指令 16 条、布尔变量操作指令 17 条、空操作 1 条。

(3) 数据传送类指令使用最多, 执行结果一般不影响标志位, 算术运算类指令执行结果均将影响 CY、AC、OV 标志, 逻辑运算指令执行结果一般不影响标志位, 只在涉及累加器 A 时, 才会对奇偶标志 P 产生影响。控制转移类指令是改变程序走向的指令, 分有条件与无条件两类, 有条件转移类指令大都采用相对转移, 位操作指令系统有自己的累加器 CY, 只限于在位寻址区操作。

## 思考题及习题

- 4.1 寻址方式是什么?
- 4.2 89C51 指令系统有哪几种寻址方式?
- 4.3 访问特殊功能寄存器 SFR 可以采用哪些寻址方式?
- 4.4 访问 RAM 单元可以采用哪些寻址方式? 访问外部 RAM 单元有哪些指令?
- 4.5 访问外部程序存储器可以采用哪些寻址方式? 访问外部程序存储器有哪些指令?
- 4.6 试写出完成以下每种操作的指令序列:
  - (1) 将 R0 的内容传送到片内 RAM 20H;
  - (2) 将 R1 的内容传送到 R0;
  - (3) 内部 RAM 单元 10H 的内容传送到外部 RAM 单元 1000H;

(4) 外部 RAM 单元 1000H 的内容传送到 R5;

(5) 外部 ROM 单元 1000H 的内容传送到 R5;

(6) 外部 RAM 单元 2000H 的内容传送到外部 RAM 单元 2001H。

4.7 设内部 RAM (30H)=60H, (60H)=10H, (10H)=20H, (R1)=22H, (P1)=0AH, 分析以下程序执行后 (30H)=\_\_, (60H)=\_\_, (10H)=\_\_, (A)=\_\_, (B)=\_\_, (P2)=\_\_, 每条指令的机器码为多少?

```
MOV R0,#30H
MOV A,@R0
MOV R1,A
MOV B,@R1
MOV @R1,P1
MOV P2,P1
MOV 10H,#90H
```

4.8 设外部 RAM (2030H)=0FH, 分析以下指令执行后(DPTR)=\_\_, (30H)=\_\_, (2030H)=\_\_, (A)=\_\_, 每条指令的机器码为多少?

```
MOV DPTR,#2030H
MOVX A,@DPTR
MOV 30H,A
MOV A,#3FH
MOVX @DPTR,A
```

4.9 编写指令实现下列位操作:

(1) 使累加器的最高 2 位清零;

(2) 屏蔽(清零) 20H 的高 4 位;

(3) 将 E0H 的低 4 位取反, 高 4 位不变;

(4) 将 P0 的低 2 位置 1;

(5) 将 10H 的内容取补后存放到 20H。

4.10 在外部程序存储器中, 从 1020H 单元开始依次存放 0~9 的平方值: 0、1、4、9、…、81, 要求依据累加器 A 中的值 (0~9) 来查找所对应的平方值, 试设计程序实现。

4.11 设(R0)=20H, (20H)=40H, (A)=58H, 则:

执行 XCH A,@R0 后(A)=\_\_, (20H)=\_\_

若执行 XCHD A,@R0 后(A)=\_\_, (20H)=\_\_

4.12 试编写程序序列, 完成两个 16 位数的减法: (30H)(31H)-(10H)(11H) → (30H)(31H)。

4.13 试编写程序, 将 R0 中的低 4 位数与 R1 中的高 4 位数合并成一个 8 位数, 并将其存放在 R0 中。

4.14 设计双字节无符号数加法程序实现(R0 R1)+(R2 R3) → (R4 R5), R0、R2、R4 存放 16 位数的高字节, R1、R3、R5 存放低字节, 假设其和不超过 16 位。

4.15 设计双字节无符号数相减程序实现(R0 R1)-(R2 R3) → (R4 R5)。R0、R2、R4 存放 16 位数的高字节, R1、R3、R5 存放低字节。

4.16 设两个 BCD 码数存在外部 RAM 的 2000H 和内部 RAM 的 20H, 设计程序实现两个 BCD 码相加, 其结果的十位和个位送到外部 RAM 的 2000H 单元, 结果的百位值送 F0 位。

4.17 设变量 X 存放在片内 10H 单元中, 函数 Y 存放在片内 20H 单元。编写程序实现如下函数功能:

$$Y = \begin{cases} 80H & X > 0 \\ 50 & X = 0 \\ FFH & X < 0 \end{cases}$$

4.18 利用位逻辑指令，模拟图 4.9 所示硬件逻辑电路功能，试编写程序实现。

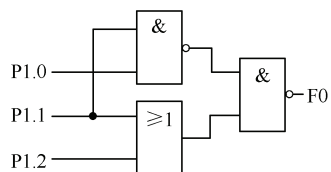


图 4.9 题 4.18 图

4.19 若(CY)=0, (P1)=10110111B, 试指出执行下列程序段后, CY、P1 口内容的变化情况。

```

MOV  P1.2,C
MOV  C,P1.4
JBC  P1.7,SS
ORL  C,P1.6
SS:  CPL  P1.3
      ANL  C,/P1.3
      MOV  P1.0,C

```

## 第5章 80C51 的汇编语言程序设计

一个完整的单片机应用系统是合理的硬件与完善的软件的有机组合，二者缺一不可。所谓的软件设计就是指程序的设计。程序实际上是一系列计算机指令的有序集合。我们把利用计算机的指令系统来合理地编写出解决某个问题的程序的过程，称为程序设计。

目前，80C51 单片机的程序设计主要采用两种语言：一种是汇编语言，另一种是高级语言（如 C51）。汇编语言生成的目标程序占存储空间少、运行速度快，具有效率高、实时性强的优点，适合于编写短小高速的程序。高级语言对系统的功能描述与实现比用汇编语言简单，程序的阅读、修改和移植比较方便，适合于编写复杂些的程序。

汇编语言是面向机器的，对单片机的硬件资源操作直接、概念清晰，在中小规模应用软件中广泛应用。尽管对编程人员的硬件知识要求比较高，但对于掌握单片机的硬件结构非常有益。

### 5.1 程序编制的方法和技巧

#### 5.1.1 程序编制的步骤

##### 1. 任务的分析

首先，要对单片机应用系统预完成的任务进行深入的分析，明确系统的设计任务、功能要求和技术指标。其次，要对系统的硬件资源和工作环境进行分析。这是单片机应用系统程序设计的基础和条件。

##### 2. 建立思路，确定算法

算法是解决具体问题的方法。应用系统经过分析、研究和明确规定后，对应实现的功能和技术指标可以利用严密的数学方法或数学模型来描述，从而把实际问题转化成由计算机进行处理的问题。

同一个问题的算法可以有多种，结果也可能不尽相同，所以，应对各种算法进行分析比较，并进行合理的优化。

##### 3. 程序总体设计及流程图绘制

经过任务分析、算法优化后，就可以进行程序的总体构思，确定程序的结构和数据形式，并考虑资源的分配和参数的计算等。然后根据程序运行的过程，勾画出程序执行的逻辑顺序，用图形符号将总体设计思路及程序流向绘制在平面图上，从而使程序的结构关系直观明了，有利于编写程序，也便于对程序进行检查和修改。

清晰正确的流程图是编制正确无误的应用程序的基础和条件。流程图可以分为总流程图和局部流程图。总流程图侧重反映程序的逻辑结构和各程序模块之间的相互关系。局部流程图反映程序模块的具体实施细节。对于简单的应用程序，可以不画流程图。但是当程序较为复杂时，绘制流程图是一个良好的编程习惯。常用的流程图符号有：开始和结束符号、工作任务符号、判断分支符号、程序连接符号、程序流向符号等，如图 5.1 所示。

##### 4. 编写源程序，上机进行调试

有了明确的算法和清晰的流程图后，就可以依据节省数据存储单元、缩短程序长度和编写时间三个原则编写程序，并进行上机调试，并最终确定程序。

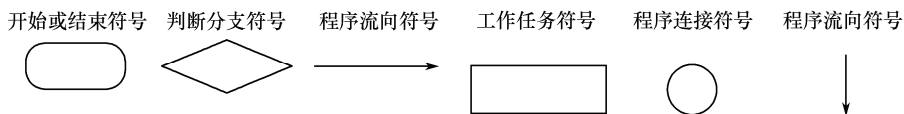


图 5.1 常用程序流程图符号

## 5.1.2 程序编制的方法和技巧

### 1. 采用模块化程序设计方法

应用系统的程序由包含多个模块的主程序和各种子程序组成。各程序模块都要完成一个明确的任务，实现某个具体的功能，如发送、接收、延时、打印和显示等。

模块化的程序设计方法具有明显的优点。把一个多功能的复杂的程序划分为若干个简单的、功能单一的程序模块，有利于程序的设计和调试，有利于程序的优化和分工，提高了程序的阅读性和可靠性，使程序的结构层次一目了然。

### 2. 尽量采用循环结构和子程序

采用循环结构和子程序可以使程序的长度减少、占用内存空间减少。

## 5.1.3 汇编语言的语句种类及指令格式

### 1. 汇编语言语句的种类

汇编语言语句有 3 种基本类型：指令语句、伪指令语句和宏指令语句。

指令语句：每一个指令语句都在汇编时产生一个目标代码，对应着机器的一种操作。

伪指令语句：伪指令语句是一种说明语句，主要是为汇编程序服务的，在汇编时没有目标代码与此对应，没有对应的机器操作。

宏指令语句：用以代替汇编语言源程序中重复使用的程序段而设置的一种语句，由汇编程序在汇编时产生相应的目标代码。

### 2. 汇编语言的语句格式

指令语句的格式：

[标号:] 操作码(助记符) [操作数](参数) [;注释]

伪指令语句格式：

[标号:] 定义符 [参数] [;注释]

#### (1) 标号

标号是语句地址的标志符号，用于引导对该语句的非顺序访问。有关标号的规定为：

① 由 1~8 个 ASCII 字符组成，第一个字符必须是非数字字符，其余字符可以是字母、数字或其他特定字符；

② 不能使用已经定义了的符号作为标号，如指令助记符、寄存器符号名称等；

③ 后边必须跟英文冒号。

#### (2) 操作码

操作码用于规定语句执行的操作。它是汇编语句中唯一不能空缺的部分，由指令助记符表示。

#### (3) 操作数

操作数用于给指令的操作提供数据或地址。在一条汇编语句中操作数可能是空缺的，也可能包括一项，还可能包括两项或三项。各操作数间以逗号分隔。操作数字段的内容可能包括以下几种情况：

① 工作寄存器名；

② 特殊功能寄存器名；

- ③ 标号名;
- ④ 常数;
- ⑤ 符号“\$”，表示程序计数器 PC 的当前值;
- ⑥ 表达式。

#### (4) 注释

注释用来说明语句的功能、性质及执行结果，可以增加程序的可读性，有助于编程人员的阅读和维护。注释字段必须以分号“;”开头，长度不限，当一行书写不下时，可以换行接着书写，但换行时应注意要在开头使用分号“;”。

#### (5) 数据的表示形式

数据可以有以下几种表示形式。

- ① 二进制数，末尾以字母 B 标识。如：1000 1111B。
- ② 十进制数，末尾以字母 D 标识或将字母 D 省略。如：88D，66。
- ③ 十六进制数，末尾以字母 H 标识。如：78H，0A8H（但应注意的是，十六进制数以字母 A~F 开头时应在其前面加上数字“0”）。
- ④ ASCII 码，以单引号括起来标识。如：'AB'，'1245'。

### 3. 常用伪指令

伪指令是汇编程序能够识别并对汇编过程进行某种控制的汇编命令。它不是单片机执行的指令，所以没有对应的可执行目标码，汇编后产生的目标程序中不会再出现伪指令。下面介绍常用的伪指令。

#### (1) 起始地址设定伪指令 ORG

格式：ORG 表达式

功能：说明下面紧接的程序段或数据段存放的起始地址，表达式通常为十六进制地址。

```
ORG 1000H
MAIN: MOV DPTR,#3000H
...
```

此时规定该段程序的机器码从地址 1000H 单元开始存放。

在每一个汇编语言源程序的开始，都要设置一条 ORG 伪指令来指定该程序在存储器中存放的起始位置。若省略 ORG 伪指令，则该程序段从 0000H 单元开始存放。在一个源程序中，可以多次使用 ORG 伪指令，规定不同程序段或数据段存放的起始地址，但要求地址值由小到大依序排列，也不允许空间重叠。

#### (2) 汇编结束伪指令 END

格式：END

功能：结束汇编。汇编程序遇到 END 伪指令后即结束汇编。处于 END 之后的程序，汇编程序将不处理。

#### (3) 字节数据定义伪指令 DB

格式：[标号:] DB 字节数据表

功能：从标号指定的地址开始，在 ROM 中定义字节数据。该伪指令将字节数据表中的数据根据从左到右的顺序依次存放在指定的存储单元中。一个数据占一个存储单元。通常用于定义数据表格，程序中使用查表指令将数据取出。例如：

```
ORG 1000H
MAIN: MOV DPTR,#TAB ;取出数据表的起始地址,即数据 00H 的地址
```



```

MOV A,#01H
MOVC A,@A+DPTR ;把数据表起始地址加 1 后,对应数据送到累加器 A 中
TAB: DB 01H,02H,03H,04H,05H
END

```

#### (4) 字数据定义伪指令 DW

格式: [标号:] DW 字常数表

DW 伪指令是定义一个字 (即 16 位二进制数)。功能是从标号指定的地址单元开始, 在程序存储器中定义字数据。16 位的二进制数存放次序为: 高 8 位存放在低地址单元, 低 8 位存放在高地址单元 (大端模式)。例如:

```

ORG 1000H
TAB: DW 1234H,19

```

汇编结果为: (1000H)=12H, (1001H)= 34H  
(1002H)=00H, (1003H)=13H

#### (5) 定义常值为符号名伪指令 EQU

格式: 符号名 EQU 常值表达式

功能是将表达式的常值或特定的某个汇编符号定义为一个指定的符号名, 方便修改和阅读程序, 编译器在汇编过程中会把源程序中每个出现该符号的位置均用同 EQU 定义的数据或汇编符号来取代。EQU 伪指令中的字符名必须先赋值后才能使用, 故该语句通常放在源程序的开头。例如:

```

ORG 1000H
CH1 EQU 50H
CH2 EQU R3
MOV A,CH1 ;(50H)→A,相当于 MOV A,50H
MOV A,CH2 ;R3→A,相当于 MOV A,R3
END

```

#### (6) 位地址符号定义伪指令 BIT

格式: 符号名 BIT 位地址表达式

功能是将位地址赋给指定的符号名。其中, 位地址表达式可以是绝对地址, 也可以是符号地址。例如:

```

X1 BIT P1.0

```

将 P1.0 的位地址赋给符号名 X1, 在其后的编程中就可以用 X1 来代替 P1.0。

## 5.2 源程序的编辑和汇编

### 1. 源程序的编辑

源程序的编辑就是利用 PC 上的各种文本编辑软件上编写好汇编语言源程序, 编辑好的源程序应以 “.ASM” 扩展名存盘, 以备汇编程序调用。

### 2. 源程序的汇编

将汇编语言源程序转换为单片机能执行的目标程序的过程叫汇编。常用的方法有两种。

① 手工汇编: 通过人工方式查指令编码表, 逐条翻译, 然后把得到的机器码程序输入单片机系统中进行调试。

② 机器汇编: 是在 PC 上使用交叉汇编程序将汇编语言源程序转换为机器码形式的目标程序, 生成的目标程序由 PC 传送到单片机系统。

源程序经过机器汇编后，形成两个主要文件：一是列表文件（.LST），另一个是目标代码文件（.OBJ）。

### 5.3 汇编语言程序设计和基本程序结构

#### 5.3.1 顺序程序设计

顺序程序是指计算机按指令在程序存储器中存放的先后次序来顺序执行。它是无分支结构、无循环结构，也不调用子程序。

顺序结构虽然简单明了，但程序所占的空间较大。因此，顺序程序设计的好坏会涉及整个程序的效率。一个好的顺序程序段，应尽可能使其占用的空间少，执行速度快。

**【例 5.1】**对片外数据存储单元 1000H、1001H 地址单元中的数据作“与”运算，并把结果放到片内 30H 单元中。

流程图如图 5.2 所示，程序如下：

```
ORG 0000H
LJMP MAIN
ORG 0050H
MAIN:MOV DPTR,#1000H ;设置指针初值
MOVX A,@DPTR ;取 1000H 单元中的数据
MOV R0,A ;保存到 R0 中
INC DPTR ;指针加 1
MOVX A,@DPTR ;取 1001H 单元中的数据
ANL A,R0 ;两个数据相与
MOV 30H,A ;把结果存到 30H 单元中
SJMP $
END
```

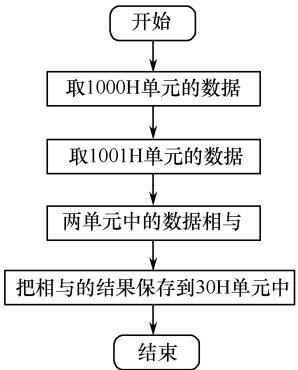


图 5.2 顺序程序设计流程图

本书第 6 章将要介绍 C51 语言，但为方便读者学习 C51 语言，从本章开始有些例题在给出汇编源程序的同时，还给出 C51 源程序，供读者参考。

C51 源程序如下：

```
#include<reg51.h>
#include<absacc.h>
void main()
{
    char a,b,c;
    a = XBYTE[0x1000];
    b = XBYTE[0x1001];
    c = a && b;
    DBYTE[0x30] = c;
    while(1);
}
```

#### 5.3.2 分支程序

在实际应用中，很多应用程序需要含有判断、比较环节，根据不同的条件执行不同的操作，

在程序设计时应该借助框图来明确程序的走向，为每个选择分支编写一段单独的程序，并为分支起个有意义的名字，这样编程思路会很清晰，大大提高编程的效率。

从形式上可以把分支结构分为单分支、双分支和多分支几种情况，如图 5.3 所示。

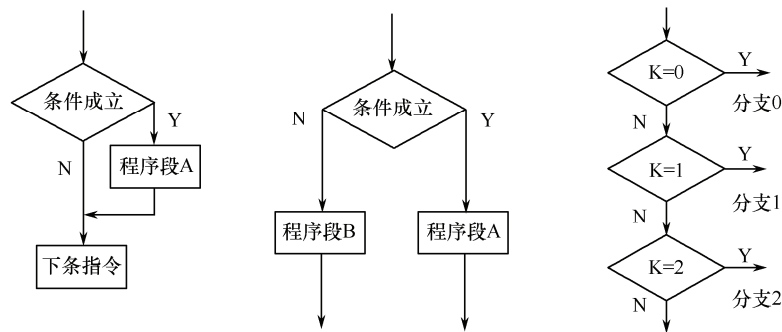


图 5.3 分支程序图

1. 单分支程序

当程序的判断是二选一时，称为单分支选择结构。

**【例 5.2】**比较两个无符号数大小，设两个无符号数分别存放在内部 RAM 的 30H 和 31H 单元中，比较大小后把大数存到 32H 中。

汇编源程序如下：

```
ORG 0000H
LJMP MAIN
ORG 1000H
MAIN: CLR C ;保证前面的操作不会对后面结果有影响
MOV A,30H ;取 30H 单元中的数据到累加器中
SUBB A,31H ;30H 单元中的数减去 31H 单元中的数,两数大小比较
JC DATA2 ;条件判断
MOV 32H,30H ;30H 单元中的数大
WAIT: SJMP $
DATA2: MOV 32H,31H ;31H 单元中的数大
SJMP WAIT
END
```

流程图如图 5.4 所示。

C51 源程序如下：

```
#include<reg51.h>
#include<absacc.h>
void main()
{
    unsigned char a,b;
    a = DBYTE[0x30];
    b = DBYTE[0x31];
    if(a>b) DBYTE[0x32] = a;
    else if(b>a) DBYTE[0x32] = b;
    while(1);
}
```

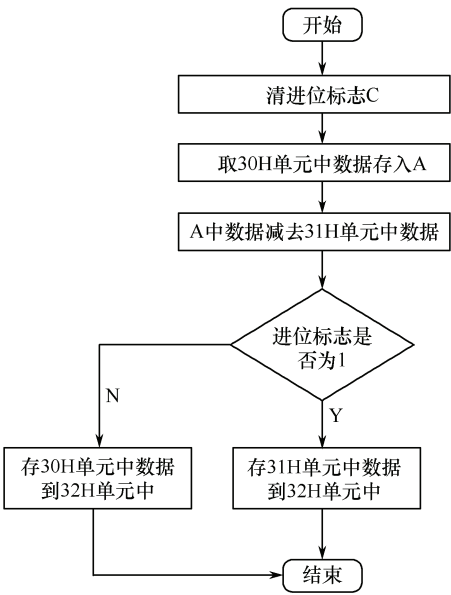


图 5.4 单分支程序流程图

## 2. 多分支程序

当程序的条件判断有两个或者两个以上时，称为多分支结构程序。多分支程序一般用散转指令和比较指令实现。

**【例 5.3】**利用散转指令编写程序，根据 30H 单元中变量 X 的内容转入相应的分支。X=0 时执行 Y=0+0；X=1 时执行 Y=1+1；X=2 时执行 Y=2+2。并将结果存入 31H 单元中。

流程图如图 5.5 所示，程序如下：

```

        ORG 0000H
        LJMP MAIN
        ORG 1000H
MAIN:    MOV A,30H
        MOV DPTR,#TAB ;散转程序入口地址
        RL A           ;每个入口地址均为 2 字节
        JMP @A+DPTR
WAIT:    SJMP $
TAB:     AJMP X0
        AJMP X1
        AJMP X2
X0:      MOV A,#0
        RL A
        MOV 31H,A
        LJMP WAIT
X1:      MOV A,#1
        RL A
        MOV 31H,A
        LJMP WAIT
X2:      MOV A,#2
        RL A
        MOV 31H,A
        LJMP WAIT
        END
    
```

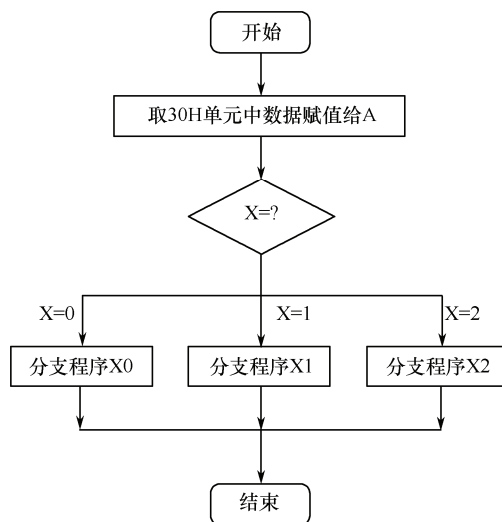


图 5.5 多分支程序流程图

C51 源程序如下：

```

#include<reg51.h>
#include<absacc.h>
void main()
{
    char X,Y;
    X = DBYTE[0x30];
    switch(X)
    {
        case 0: Y = 0+0; break;
        case 1: Y = 1+1; break;
        case 2: Y = 2+2; break;
    }
    DBYTE[0x31] = Y;
}
    
```

```

while(1);
}

```

【例 5.4】有一数据块从片内 RAM 的 30H 单元开始存入，设数据块长度为 10 个单元。根据下式：

$$Y = \begin{cases} X + 2 & X > 0 \\ 100 & X = 0 \\ |X| & X < 0 \end{cases}$$

求出 Y 值，并将 Y 值放回原处。

参考程序如下：

```

ORG 0000H
MOV R0,#10
MOV R1,#30H
START: MOV A,@R1      ;取数
        JB ACC.7,NEG    ;若为负数,转 NEG
        JZ ZERO         ;若为零,转 ZERO
        ADD A,#02H      ;若为正数,求 X+2
        AJMP SAVE       ;转到 SAVE,保存数据
ZERO:   MOV A,# 64H     ;数据为零,Y=100
        AJMP SAVE       ;转到 SAVE,保存数据
NEG:    DEC A           ;求 |X| (减 1 后取反)
        CPL A
SAVE:   MOV @R1,A       ;保存数据
        INC R1          ;地址指针指向下一个地址
        DJNZ R0,START   ;数据未处理完,继续处理
        SJMP $          ;暂停
END

```

C51 源程序如下：

```

#include<reg51.h>
void main()
{
    char i,X,*Y;
    Y = 0x30;
    for(i=0;i<10;i++)
    {
        X = *Y;
        if(X>0) *Y = X+2;
        if(X==0) *Y = 100;
        if(X<0) *Y = 0-X;
        Y++;
    }
    while(1);
}

```

### 5.3.3 循环程序

在实际设计中，常常会遇到功能相同、需要多次重复执行某段程序，用循环程序的方法来解决就比较合适。循环程序有助于节省程序空间，使程序更加紧凑，提高程序的质量，但并不能节约 CPU 的执行时间。

循环程序一般由 4 个部分组成。

① 循环初始化，即设置循环过程中有关工作单元的初始值，如清工作单元，置循环次数、地址指针和给某些变量赋初值等。

② 循环体，循环体是循环结构的主体，完成主要的计算或者操作任务，是重复执行的程序段。

③ 循环控制，这一部分主要是完成循环条件的设定，修改循环变量、数据指针及地址指针等循环变量，并检测循环条件是否仍满足，判断是否结束循环。

④ 循环结束，该部分主要是完成循环结束后的处理工作，如对结果进行分析、处理、保存。

循环程序有先执行后判断和先判断后执行两种基本结构，如图 5.6 所示。

循环程序又分单循环程序和多重循环程序，下面举例说明。

#### 1. 单循环程序

**【例 5.5】**编写程序，实现内部 RAM 30H 单元开始的 20 个单元全部清 0。

程序如下：

```
ORG 0000H
LJMP MAIN
ORG 1000H
MAIN: MOV R1,#30H      ;地址指针赋初值
      MOV R3,#20       ;循环次数
LOOP: MOV @R1,#0       ;相应地址单元清 0
      INC R1           ;地址指针加 1
      DJNZ R3,LOOP     ;判断循环是否结束
      SJMP $
      END
```

C51 源程序如下：

```
#include<reg51.h>
void main()
{
    char i,*P;
    P = 0x30;
    for(i=0;i<20;i++)
    {
        *P = 0;
        P++;
    }
}
```

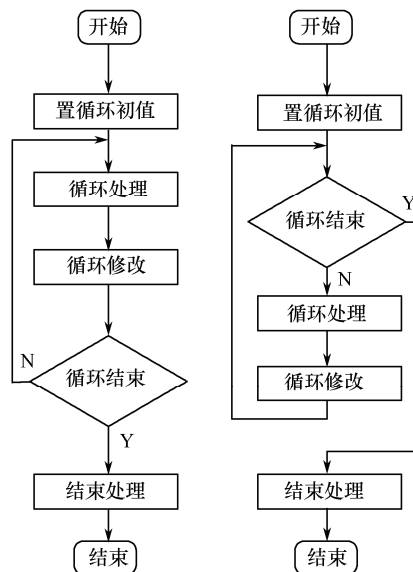


图 5.6 循环程序结构图

```

    }
    while(1);
}

```

## 2. 多重循环程序

【例 5.6】编写程序,利用软件实现 100ms 的延时。假设使用 12MHz 晶振,一个机器周期为 1μs,利用 DJNZ 指令构成循环,执行一条 DJNZ 指令需要两个机器周期,即 2μs,适当设置循环次数,便可实现所需延时。

程序如下:

```

                ORG  0000H
                LJMP  DELAY
                ORG  1000H
DELAY:  MOV  R7,#250           ;外循环次数
DELAY1: MOV  R6,#200           ;内循环次数
DELAY2: DJNZ  R6,DELAY2        ;内循环时间 200*2=400μs
        DJNZ  R7,DELAY1        ;外循环时间 0.4ms*250=100ms
        SJMP  $
                END

```

C51 源程序如下:

```

#include<reg51.h>
void main()
{
    unsigned char i,j;
    for(i=0;i<250;i++)
    {
        for(j=0;j<200;j++);
    }
    while(1);
}

```

注意:本程序的精确延时还要算上其他一些指令周期,精确延时时间为:  $2+250 \times (1+400+2)=100.752 \text{ ms}$ 。还有用软件实现延时,不允许有中断,否则将严重影响定时的准确性。

## 5.3.4 子程序及其调用

### 1. 子程序的调用

在设计中,有些运算和操作是要多次重复执行的,如数制转换、数值计算等。如果每次用到同一功能的程序都要重新写一遍,不仅使程序烦琐冗长,而且浪费编程时间和存储空间。因此,对于一些常用的程序段,按一定的结构编写成固定程序段,这样的程序段称为子程序,当需要时,就可以调用子程序,而不必重新编写每条指令。

主程序只要执行指令 ACALL 和 LCALL,就可以使程序转到子程序去执行相应操作。子程序执行完后,用 RET 指令返回主程序继续执行。一个子程序在其运行过程中,还可以调用其他的子程序,这称为子程序的嵌套。MCS-51 单片机的指令系统对子程序嵌套的层数没有限制,但是会受到堆栈容量的限制。

子程序调用有以下几个优点:

- ① 避免了对相同程序段的重复编写;

② 简化程序的逻辑结构，便于阅读、查错，同时也便于子程序调试；

③ 节省存储器空间。

子程序编写和调用过程时要注意以下几点。

① 应给子程序命名。子程序的第一条指令应加标号作为子程序名，子程序调用指令通过此标号对子程序进行调用。

② 子程序的结尾必须为子程序返回指令 RET。

③ 子程序嵌套时应考虑堆栈的深度。

④ 能正确传递入口参数和出口参数。

⑤ 现场的保护和恢复。

在子程序执行过程中，常常要用到单片机的一些通用单元，如工作寄存器R0~R7、累加器A、数据指针DPTR，以及有关标志和状态等。而这些单元中的内容在调用结束后的主程序中仍要用到，因此对那些主程序和子程序中都要用到的寄存器，在转移之前应将其内容压入堆栈进行保护，称为现场保护。在执行完子程序，返回继续执行主程序前，被保护的数据出栈，恢复其原内容，称为现场恢复。

以下对子程序调用时要注意的两点进行举例介绍：一是现场的保护和恢复；二是主程序与子程序的参数传递。

#### （1）现场保护与恢复

现场保护与恢复的方法有以下两种：

● 在主程序中实现；

● 在子程序中实现。

在主程序中实现示例如下：

```
PUSH PSW           ;保护现场
PUSH ACC
PUSH B
MOV PSW,#10H       ;换当前工作寄存器组

LCALL addr15        ;子程序调用
POP B               ;恢复现场
POP ACC
POP PSW
...
```

其特点是结构灵活。

在子程序中实现示例如下：

```
SUB1: PUSH PSW      ;保护现场
      PUSH ACC
      PUSH B
      ...
      MOV PSW,#10H   ;换当前工作寄存器组
      ...
      POP B           ;恢复现场
      POP ACC
      POP PSW
      RET
```



其特点是程序规范、清晰。

注意：无论哪种方法保护与恢复的顺序要对应。

## (2) 参数传递

在调用子程序时，主程序应通过某种方式把子程序的入口参数传给子程序，当子程序执行完毕后，又需要通过某种方式把子程序的出口参数传给主程序。在 80C51 单片机中，传递参数的方法有 3 种。

### ● 利用累加器或寄存器

在这种方式中，要把预传递的参数存放在累加器 A 或工作寄存器 R0~R7 中。

【例 5.7】编写程序，实现  $c=a^2+b^2$ 。设 a、b 均小于 10，a、b、c 分别存于内部 RAM 的 30H、31H、32H 三个单元中。主程序如下：

```
ORG 0000H
LJMP MAIN
ORG 0100H
MAIN: MOV SP,#3FH      ;设置堆栈指针
      MOV A,30H        ;取 a 值
      ACALL SQR         ;调用子函数
      MOV R1,A          ;a2 值暂存 R1 中
      MOV A,31H        ;取 b 值
      ACALL SQR         ;调用子函数
      ADD A,R1          ;a2+b2
      MOV 32H,A         ;结果存到 32H
      SJMP $
```

子程序：

```
SQR: MOV DPTR,#TAB ;查表
      MOVC A,@A+DPTR
      RET
TAB: DB 0,1,4,9,16,25,36,49,64,81
      END
```

C51 源程序如下：

```
#include<reg51.h>
#define uchar unsigned char
uchar sqr(uchar x,uchar y)
{
    uchar z;
    z=x*x+y*y;
    return(z);
}
void main()
{
    uchar *a,*b,*c;
    a=0x30;
    b=0x31;
    c=0x32;
    *c=sqr(*a,*b);
}
```

```
while(1);
}
```

### ● 利用存储器

当传送的数据量比较大时，可以利用存储器实现参数的传递。在这种方式中，事先要建立一个参数表，用指针指示参数表所在的位置。当参数表建立在内部 RAM 时，用 R0 或 R1 作参数表的指针。当参数表建立在外部 RAM 时，用 DPTR 作参数表的指针。

**【例 5.8】**将 R0 和 R1 指向的内部 RAM 中两个 3 字节无符号整数相加，结果送到由 R0 指向的内部 RAM 中。入口时，R0 和 R1 分别指向加数和被加数的低位字节；出口时，R0 指向结果的高位字节。低字节在高地址，高字节在低地址。

实现程序：

```
NADD:  MOV  R7,#3      ;三字节加法
        CLR  C
NADD1:  MOV  A,@R0      ;取加数低字节
        ADDC A,@R1      ;被加数低字节加 A
        MOV  @R0,A
        DEC  R0
        DEC  R1
        DJNZ R7,NADD1
        INC  R0
        RET
```

### ● 利用堆栈

在调用子程序前，用 PUSH 指令将子程序中所需数据压入堆栈，进入执行子程序时，再用 POP 指令从堆栈中弹出数据。

**【例 5.9】**把内部 RAM 中 20H 单元中的 1 字节十六进制数转换为 2 位 ASCII 码，存放在 31H 和 32H 两个单元中。

分析：十六进制数 0~9 的 ASCII 码为 30H~39H，即十六进制数 (0~9)=ASCII 码-30H；十六进制数 A~F 的 ASCII 码为 41H~46H，即十六进制数 (A~F)=ASCII-37H。根据此对应关系，编写如下程序：

；主程序：

```
ORG 0000H
LJMP MAIN
ORG 0090H
MAIN:MOV SP,#5FH      ;设置堆栈指针
      PUSH 20H
      LCALL SBU        ;调用子函数
      POP 31H
      MOV A,20H
      SWAP A
      PUSH ACC
      LCALL SBU
      POP 32H
      SJMP $
```

；子程序：

```
SBU: DEC SP
```

```

DEC SP
POP ACC
ANL A,#0FH
MOV DPTR,#TAB
MOVC A,@A+DPTR
PUSH ACC
INC SP
INC SP
RET

TAB: DB 030H,031H,032H,033H,034H,035H,036H,037H
      DB 038H,039H,041H,042H,043H,044H,045H,046H
      END

```

C51 源程序如下:

```

#define Number    (*(volatile unsigned char*)0x20)    //待转换数据
#define Result1   (*(volatile unsigned char*)0x31)    //转换结果 1
#define Result2   (*(volatile unsigned char*)0x32)    //转换结果 2

int main(void)
{
    unsigned char temp=0; //高 4 位转换
    temp = (Number & 0xF0)>>4;
    if(temp<0x0A)
    {
        Result2 = temp + 0x30;
    }
    else {
        Result2 = temp + 0x37;
    }

    //低 4 位转换
    temp=(Number & 0x0F);
    if(temp<0x0A)
    {
        Result1 = temp + 0x30;
    }else{
        Result1 = temp + 0x37;
    }
    return 0;
}

```

一般说来:

- 当相互传递的数据较少时, 采用寄存器传递方式可以获得较快的传递速度;
- 当相互传递的数据较多时, 宜采用存储器或堆栈方式传递;
- 如果是子程序嵌套时, 最好是采用堆栈方式。

## 5.4 常用程序举例

### 5.4.1 算术运算程序

80C51 单片机的指令系统提供的是字节运算指令，所以在处理多字节数的加、减运算时，要合理地运用进位（借位）标志。

**【例 5.10】**多字节无符号数的加法。

设两个  $L$  字节的无符号数分别存放在内部 RAM 中以 30H 和 40H 开始的单元中，相加后的结果要求存放在 40H 数据区。

```
;3 字节无符号数相加
      ORG 0000H
      LJMP MAIN
      ORG 1000H
MAIN: MOV R0,#30H
      MOV R1,#40H
      MOV R7,#3           ;相加的字节数
      CLR C
LOOP: MOV A,@R0
      ADDC A,@R1          ;求和
      MOV @R1,A           ;保存结果
      INC R0              ;修改指针
      INC R1
      DJNZ R7, LOOP
      SJMP $
      END
```

C51 源程序如下：

```
#define NumStartAdd1 (volatile unsigned *)0x30 //定义数据初始地址
#define NumStartAdd2 (volatile unsigned *)0x40 //定义数据初始地址

int main(void)
{
    unsigned char *num1; //数据 1 指针变量
    unsigned char *num2; //数据 2 指针变量
    char carry = 0;       //进位变量
    char N=3;             //相加的字节数，这里假设为 3 字节
    num1 = NumStartAdd1;  //初始化数据指针
    num2 = NumStartAdd2;
    for(;N>0;N--)         //循环操作
    {
        *num2 = (carry + *num1 + *num2)% 0x100; //保存结果
        if((*num1 + *num2)>0xFF)                //判断进位
        {
            carry = 1;
        }else{
            carry = 0;
        }
    }
}
```

```

    }
    num1++;
    num2++;
}
return 0;
}

```

【例 5.11】多字节无符号数的减法。

设两个  $N$  字节的无符号数分别存放在内部 RAM 中以 DATA1 和 DATA2 开始的单元中，相减后的结果要求存放在 DATA2 数据区。

```

        MOV  R0,#DATA1
        MOV  R1,#DATA2
        MOV  R7,#N           ;置字节数
        CLR  C
LOOP:   MOV  A,@R0
        SUBB A,@R1           ;求差
        MOV  @R1,A           ;存结果
        INC  R0              ;修改指针
        INC  R1
        DJNZ R7,LOOP
        SJMP $
        END

```

## 5.4.2 代码转换

### 1. 十六进制数与 ASCII 码间的转换

十六进制数与 ASCII 码的对应关系如表 5.1 所示。当十六进制数在 0~9 之间时，其对应的 ASCII 码值为该十六进制数加 30H；当十六进制数在 A~F 之间时，其对应的 ASCII 码值为该十六进制数加 37H。

表 5.1 十六进制数与 ASCII 码关系表

十六进制数	ASCII 码	十六进制数	ASCII 码	十六进制数	ASCII 码	十六进制数	ASCII 码
0	30H	4	34H	8	38H	C	43H
1	31H	5	35H	9	39H	D	44H
2	32H	6	36H	A	41H	E	45H
3	33H	7	37H	B	42H	F	46H

【例 5.12】将 1 位十六进制数转换成相应的 ASCII 码。

设十六进制数存放在 R0 中，转换后的 ASCII 码存放于 R2 中。实现程序如下：

```

HASC:  MOV  A,R0              ;取 4 位二进制数
        ANL  A,#0FH          ;屏蔽掉高 4 位
        PUSH ACC              ;4 位二进制数入栈
        CLR  C                ;清进(借)位位
        SUBB A,#0AH           ;用借位位的状态判断该数在 0~9 还是 A~F 之间
        POP  ACC              ;弹出原 4 位二进制数
        JC   LOOP             ;借位位为 1,跳转至 LOOP
        ADD  A,#07H           ;借位位为 0,该数在 A~F 之间,加 37H

```

```

LOOP: ADD  A,#30H      ;该数在 0~9 之间,加 30H
      MOV  R2,A        ;ASCII 码存于 R2
      RET

```

C51 源程序如下:

```

int main(void)
{
    unsigned char source;
    unsigned char result;
    if((source & 0x0F)>=0x0A)
        result = (source & 0x0F) + 0x37;
    else
        result = (source & 0x0F) + 0x30;
    return 0;
}

```

**【例 5.13】**将多位十六进制数转换成 ASCII 码。

设地址指针 R0 指向十六进制数低位, R2 中存放字节数, 转换后地址指针 R0 指向十六进制数的高位。R1 指向要存放的 ASCII 码的高位地址。实现程序如下:

```

HTASC: MOV  A,@R0      ;取低 4 位二进制数
      ANL  A,#0FH
      ADD  A,#15        ;偏移量修正
      MOVC A,@A+PC      ;查表
      MOV  @R1,A        ;存 ASCII 码
      INC  R1
      MOV  A,@R0      ;取十六进制数高 4 位
      SWAP A
      ANL  A,#0FH
      ADD  A,#06H      ;偏移值修正
      MOVC A,@A+PC
      MOV  @R1,A
      INC  R0          ;指向下一单元
      INC  R1
      DJNZ R2,HTASC    ;字节数存于 R2
      RET

```

```

ASCTAB: DB  30H,31H,32H,33H,34H,35H,36H,37H
          DB  38H,39H,41H,42H,43H,44H,45H,46H

```

## 2. BCD 码与二进制数之间的转换

在计算机中, 十进制数要用 BCD 码来表示。通常, 用 4 位二进制数表示 1 位 BCD 码, 用 1 字节表示 2 位 BCD 码 (称为压缩型 BCD 码)。

**【例 5.14】**双字节二进制数转换成 BCD 码。

设(R2R3)为双字节二进制数, (R4R5R6)为转换完的压缩型 BCD 码。

十进制数 B 与一个 8 位的二进制数的关系可以表示为: 只要依十进制运算法则, 将  $b_i$  ( $i = 7, 6, \dots, 1, 0$ ) 按权相加, 就可以得到对应的十进制数 B (逐次得到:  $b_7 \times 2^0$ ;  $b_7 \times 2^1 + b_6 \times 2^0$ ;  $b_7 \times 2^2 + b_6 \times 2^1 + b_5 \times 2^0$ ;  $\dots$ )。

参考程序在“程序附件”中, 请登录华信教育资源网 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn) 下载。

### 5.4.3 I/O 操作

例如，编制一个循环闪烁灯程序。如图 5.7 所示，设 51 单片机的 P1 口作为输出口，经驱动电路 74LS240（8 反相三态缓冲驱动器）接 8 只发光二极管。当输出为“0”时，发光二极管点亮，“1”时为暗。编程实现：每个灯闪烁点亮 5 次，再转移到下一个灯闪烁点亮 5 次，一直循环下去。（DELAY1S 为延时 1s 子程序）

```
ORG 0000H
LJMP MAIN
ORG 0100H
MAIN: CLR C
      MOV A,#0FEH          ;为 LED 灯赋值，低位先亮
FLASH: MOV R2,#5           ;闪烁次数
LOOP:  MOV P1,A             ;LED 亮
      LCALL DELAY1S         ;延时 1s
      MOV P1,#0FFH         ;LED 灭
      LCALL DELAY1S         ;延时 1s
      DJNZ R2,LOOP         ;闪烁 5 次
      RLC A                ;左移一位
      SJMP FLASH           ;不断循环
END
```

C51 源程序如下：

```
#include<reg51.h>
#include<intrins.h>
void DELAY1S()    //@12MHz
{
    unsigned char i, j, k;
    _nop_();
    i = 8;
    j = 152;
    k = 136;
    do
    {
        do
        {
            while (--k);
        } while (--j);
    } while (--i);
}

void main()
{
    unsigned char led=0x0fe;
    while(1)
    {
        char i;
```

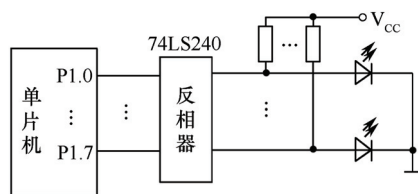


图 5.7 循环闪烁电路图

```

for(i=0;i<5;i++)
{
    P1=led;
    DELAY1S();
    P1=0X0ff;
    DELAY1S();
}
led = _crol_(led,1);
}
}

```

## 5.5 简单 I/O 设备的并口直接驱动示例

【例 5.15】 数据端与 P0 口正序连接（见图 5.8）。编写程序，分别实现功能：上电后数码管显示“P”，按下任何键后，显示从“0”开始每隔 1s 加 1，加至“F”后，数码管显示“P”，进入等待按键状态。

实现程序如下：

```

TEMP EQU 30H
ORG 0000H
JMP START
ORG 0100H
START: MOV SP,#5FH
      MOV P0,#8CH      ;显示"P"
      MOV P3,#0FFH
NOKEY: MOV A,P3
      CPL A
      JZ NOKEY          ;无键按下
      MOV TEMP,P3       ;有键按下
      LCALL D10ms
      MOV A,P3
      CJNE A,TEMP,NOKEY ;去抖
      MOV R7,#16
      MOV R2,#0
LOOP:  MOV A,R2
      MOV DPTR,#CODE_P0
      MOVC A,@A+DPTR
      MOV P0,A
      INC R2
      SETB RS0          ;切换组
      LCALL D_1S
      CLR RS0
      DJNZ R7,LOOP
      JMP START
D_1S:  (子程序)

```

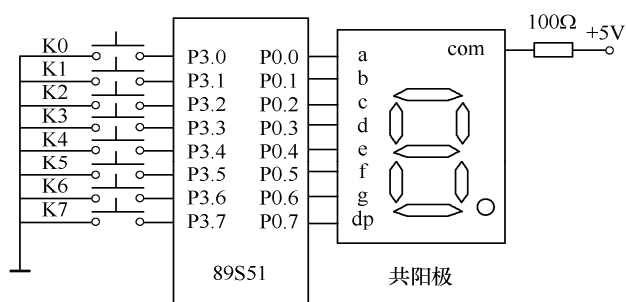


图 5.8 数码管数据端正序连接图



D10ms: (子程序)

CODE\_P0: DB 0C0H,0F9H,0A4H,0B0H, 99H,92H,82H,0F8H

DB 80H,90H,88H,83H,0C6H,0A1H,86H,8EH

有时为方便走线而采用逆序连接,如图 5.9 所示,显示段码要进行调整:

CODE\_P2:DB 03H,9FH,25H,0DH,99H,49H,40H,1FH

DB 01H,09H,11H,0C1H,63H,85H,61H,71H

C51 源程序如下:

```
#include<reg51.h>
```

```
// P0.1.2.3.4.5.6.7.8.9.A.b.C.d.E.F
```

```
unsigned char code
```

```
table[]={ 0x8c,0xc0,0xf9,0xa4,0xb0,0x99,0x92,0xf8,0x80,0x90,0x88,0x83,0xc6,0xa1,0x86,0x8e};
```

```
void delay_1ms(unsigned int i)
```

```
{  
    unsigned char j;  
    while(i--)  
        for(j=0;j<120;j++);  
}
```

```
void main()
```

```
{  
    while(1){  
        unsigned char i=0;  
        P1=table[0];  
        while(P3==0XFF);  
        delay_1ms(10);  
        if(P3!=0XFF)  
        {  
            for(i=1;i<=16;i++)  
            {  
                P1=table[i];  
                delay_1ms(1000);  
            }  
            P1=table[0];  
            i=0;  
        }  
    }  
}
```

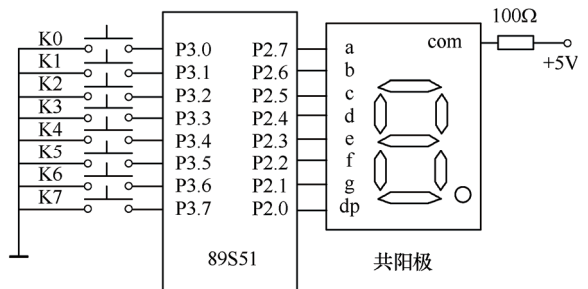


图 5.9 数码管数据端逆序连接图

Keil C51 软件仿真执行界面如图 5.10 所示, Proteus 软件仿真如图 5.11 所示。

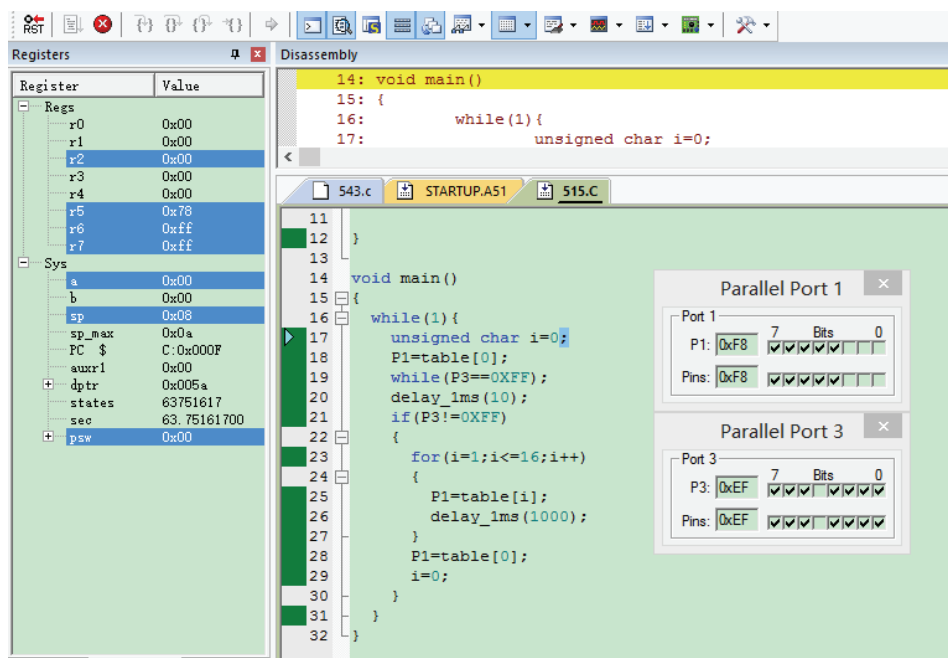


图 5.10 Keil C51 仿真执行图

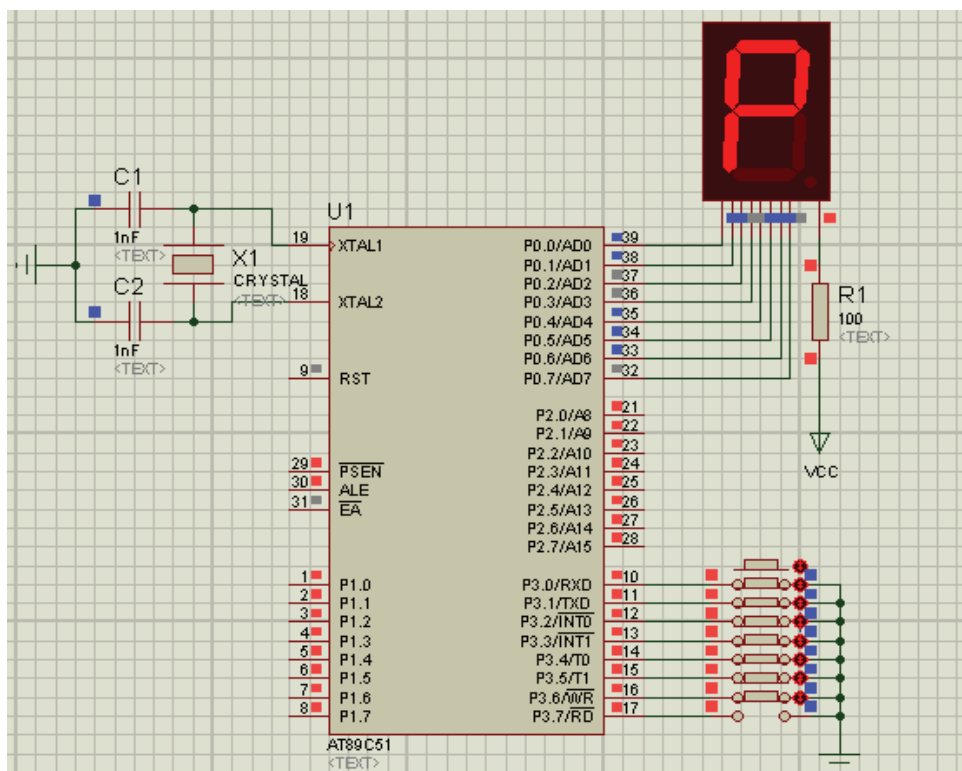


图 5.11 Proteus 软件仿真

## 本章小结

汇编语言的源程序结构紧凑、灵活，生成的目标程序占存储空间少、运行速度快，具有效

率高、实时性强的优点，适合于编写短小高速的程序。但因它是面向机器的语言，所以它缺乏通用性，编程复杂烦琐，但应用还相当广泛。

高级语言是采用模块化的程序设计，对系统的功能描述与实现比用汇编语言简单，程序的阅读、修改和移植比较方便，适合于编写复杂些的程序。

汇编语言程序设计是实践性较强的一种单片机应用技能，本章对用单片机程序设计介绍了程序编制的方法和技巧及源程序中用到的一些伪指令，重点介绍了用汇编语言对分支、循环、子程序及按键、LED 显示等程序的设计。

## 思考题及习题

- 5.1 80C51 单片机汇编语言有何特点？
- 5.2 利用 80C51 单片机汇编语言进行程序设计的步骤如何？
- 5.3 常用的程序结构有哪几种？特点如何？
- 5.4 子程序调用时，参数的传递方法有哪几种？
- 5.5 什么是伪指令？常用的伪指令功能如何？
- 5.6 设计汇编源程序，把外部 RAM 的 2000~20FFH RAM 空间置零，并进行软件仿真。
- 5.7 录入并调试一个排序子程序，其功能为用冒泡法将内部 RAM 中从 50H 开始的 10 个单字节无符号正整数，按从小到大的次序重新排列。
- 5.8 设被加数存放在内部 RAM 的 20H、21H 单元，加数存放在 22H、23H 单元，若要求和存放在 24H、25H 中，试编写出 16 位数相加的程序。
- 5.9 编写一段程序，把外部 RAM 中 1000H~1030H 单元的内容传送到内部 RAM 的 30H~60H 单元中。
- 5.10 编写程序，实现双字节无符号数加法运算，要求(R1R0)+(R7R6)→(61H60H)。
- 5.11 用 R0 和 R1 作数据指针，R0 指向第一个加数，并兼作“和”的指针，R1 指向另一个加数，字节存放到 R2 中作计数初值。
- 5.12 在内部 RAM 的 21H 单元开始存储有一组单字节不带符号数，数据长度为 30H，要求找出最大数存入 BIG 单元。
- 5.13 求双字节补码程序：设双字节数放在内部 RAM 的 30H 和 31H 单元（高字节在低地址），将其取补后存入 40H（存放高字节）和 41H（存放低字节）单元。
- 5.14 编程统计累加器 A 中“1”的个数。
- 5.15 编程实现  $1+2+3+\cdots+100=?$

## 第6章 51 单片机的 C 语言程序设计

### 6.1 单片机 C 语言概述

单片机可以使用高级语言进行开发,其中主要是以C51语言为主。C51有其特定的程序结构,并且还需要有对应的编译器才能将其编译成可执行文件。

#### 6.1.1 C51 的程序结构

C51 属于高级语言,它的程序结构与标准 C 语言基本相同。其结构特点如下:

① 函数是 C51 程序的基本单位。标准的 C51 程序通常是多个函数的集合,在这个集合当中,有且只有一个 main 函数(主函数)。不论 main 函数在整个程序中所处的位置如何, C51 程序总是从 main 函数开始执行的。

② C51 程序书写格式自由,一行内可以写几个语句。

③ 分号是 C51 语句的重要组成部分,每个语句和数据定义(函数除外)的最后必须有一个分号。

④ C51 本身没有输入/输出语句。标准的输入和输出是由 scanf 和 printf 等库函数来完成的。对于用户定义的输出,比如直接以输出端口读取键盘输入或驱动 LED,则需要自行编制输出函数。

⑤ 可以用/\*.....\*/对 C51 程序中的任何部分作注释。

#### 6.1.2 C51 编译器介绍

单片机不能直接执行 C51 程序,执行前必须经过编译器形成相应的可执行代码,目前开发的编译器种类繁多,并非所有的 C51 编译器都产生高效代码,下面就各公司的编译器作简要介绍,以便于大家选择。

**American Automation 编译器:**该编译器通过#asm 和 endasm 预处理选择支持汇编语言,此编译器的编译速度较慢。

**IAR 编译器:**IAR 编译器是由瑞典开发的,它和 ANSI C 兼容,但需要一个较复杂的链接程序才能运行。

**Keil 编译器:**Keil 编译器效率很高。它支持浮点和长整数、重入和递归,目前 Keil 编译器已被完全集成到 Keil  $\mu$ Vision4 的集成开发环境中,该集成开发环境已经将编译器、汇编器、实时操作系统、项目管理器和调试器融为一体。Keil  $\mu$ Vision4 IDE 可以支持所有 8051 的衍生产品,也可以支持所有兼容的仿真器,同时支持其他第三方开发工具。因此,Keil  $\mu$ Vision4 IDE 开发环境无疑是 8051 开发用户的最佳选择。

#### 6.1.3 C51 语言和汇编语言的关系

C51 是一种在 MCS-51 系列单片机上使用的 C 语言。C51 具有很强的语言表达能力和运算能力,而且可移植性很好,在单片机上用 C 编写程序,可以有效地提高程序员的工作效率。但

是 C51 需要编译器进行编译，目标程序的冗余度较严重，且编译器的编译效率差别较大，这对存储资源有限的系统中较大的影响。

虽然汇编语言的移植性和编程效率不及 C51，然而汇编语言也有它的优势：汇编语言精练，代码冗余度低，所以执行代码短，执行速度快；与硬件联系紧密，优秀的编程者能使 CPU 运行在最佳状态，同时能帮助初学者了解 CPU 的硬件结构。

基于 C51 语言和汇编语言的不同特点，现实中的很多系统都是用 C 语言和汇编语言联合编写的。为了提高编程效率，绝大多数代码都会采用 C51 编写，但是对时钟系统和时序要求很严格的底层驱动代码来说，使用汇编语言是唯一的选择。

## 6.2 C51 的数据类型

### 6.2.1 C51 的数据类型

数据是具有一定格式的数字或数值，是计算机操作的对象。数据操作会因数据类型不同而较大的差异，其差异主要体现在取值范围、存储位置和存储空间大小等几个方面。C51 提供的数据类型见表 6.1。

表 6.1 C51 的数据类型

数据类型		长度	取值范围
字符型	unsigned char	8	0~255
	signed char	8	-128~127
整型	unsigned int	16	0~65535
	signed int	16	-32768~32767
长整型	unsigned long	32	0~4294967295
	signed long	32	-2147483648~2147483647
浮点型	float	32	$\pm 1.18\text{e-}38 \sim \pm 3.40\text{e}38$
位型	bit	1	0 或 1
	sbit	1	0 或 1
SFR	sfr	8	0~255
	sfr16	16	0~65535

C51 的数据类型和标准 C 语言有较大的相似性，考虑到读者对 C 语言比较熟悉，下面主要介绍 C51 和标准 C 的区别。

① C 语言的基本数据类型有 char、int、short、long、float、double 等 6 种类型，而 C51 不支持复杂的双精度浮点运算（double）。

② C51 中 float 也与标准 C 一样符合 IEEE-754 标准，但 float 的使用和运算，需要调用数学库“math.h”函数的支持。

③ 布尔处理器是 8051 单片机的特色。位类型（bit）可以定义一个位变量，由 C51 编译器在 8051 内部 RAM 区 20H~2FH 的 128 个位地址中分配一个位地址。但位类型不能定义指针和数组。

④ 特殊功能寄存器（sfr 和 sfr16）：sfr 可以对 8051 的特殊功能寄存器进行定义，sfr 型数据占用一个字节，取值范围为 0~255。sfr16 为 16 位特殊功能寄存器，8051 及其兼容产品的

16 位特殊功能寄存器（如 DPTR）可以用 sfr16 来定义，sfr16 型数据占用两个字节，取值范围为 0~65535。

⑤ 在 C51 编译器提供的头文件 reg51.h 中已经把所有的特殊功能寄存器进行了定义，可以直接用 include 命令使其包括在程序中，在使用时，所有的 sfr 的名称都必须大写。

⑥ 可寻址位类型（sbit）：利用 sbit 可以对 8051 内部 RAM 的位寻址空间及特殊功能寄存器的可寻址位进行定义。例如，sbit flag = P1^0; 表示将 P1.0 这条 I/O 口线定义名为 flag 的标志。

⑦ 数据类型的转换。不同类型的数据是可以相互转换的，可以通过赋值或者强制转换。赋值转换次序为：bit→char→int→long→float，如果反向赋值，则结果丢弃高位。

### 6.2.2 C51 数据的存储类型

C51 是面向 51 单片机的程序语言，所以任何数据都必须以一定的方式存储在不同的位置。数据分为常量和变量两种形式。常量可以用一个标志符号来代表；变量由变量名和变量值组成，每个变量占据一定的存储空间用以存放变量的值。8051 的存储空间比较复杂，因此，数据的存放也同样复杂，详见表 6.2。

表 6.2 C51 的存储类型

存储器类型	长度	存储位置	说 明
data	8	片内 RAM	直接寻址：00~7FH，速度最快
bdata	8		可位寻址：20H~2FH
idata	8		间接寻址：00~FFH，MOV @Ri 访问
pdata	8	片外 RAM	分页间址：00~FFH，MOVX @Ri 指令访问
xdata	16		间接寻址：0000~FFFFH，MOVX @DPTR 访问
code	16	ROM	间接寻址：0000~FFFFH，MOVC @A+DPTR 访问

C51 对变量定义时，既可以定义数据类型，还可以定义存储类型。其格式为：

数据类型 [存储类型] 变量名

例如：

```
char data name_var; /*字符变量 name_var 存储在片内直接寻址 RAM 区*/
float idata x; /*浮点型变量 x 存储在片内间址 RAM 区*/
bit bdata flags; /*位变量 flags 存储在片内 RAM 位寻址区*/
```

存储类型为可选项，如果不做存储类型的定义，系统将选择默认存储模式，默认类型由编译控制命令指令限制。具体默认存储类型见表 6.3。

表 6.3 存储模式与默认存储类型

存储模式	默认存储类型	特点说明
SMALL	data（小模式）	存储于片内 RAM，速度快
COMPACT	pdata（紧凑模式）	存储于片外分页 RAM
LARGE	xdata（大模式）	存储于片外 64KB 的 RAM，速度慢

例如，若声明 char v，在 SMALL 模式下，v 被定位在 data 区；在使用 COMPACT 模式下，则 v 被定位在 pdata 区；在使用 LARGE 模式情况下，v 被定位在 xdata 区中。

## 6.2.3 8051 单片机特殊功能寄存器的 C51 定义

### 1. 特殊功能寄存器的声明

8051 单片机片内有 21 个特殊功能寄存器 (SFR)，它们分散在片内 RAM 区的高 128 字节中，字节地址范围为 80H~0FFH，对 SFR 的操作，只能用直接寻址方式。

为了能直接访问这些特殊功能寄存器 SFR，C51 提供了一种独特的定义方法，这种定义方法与标准 C 语言不兼容，只适用于对 8051 系列单片机进行编程。其定义语法如下：

```
sfr name=adress
```

其中，“sfr”为保留关键字，其后面必须跟一个特殊寄存器名称，该名称由程序员自主编写，但要符合 C 语言命名标准，且要符合大众化标准，以便于记忆和程序交流，通常都是将所有特殊功能寄存器的 C51 定义放入一个头文件中，以便于程序移植。

“=”后面的地址必须是常数，不允许带有运算表达式，其常数值范围必须在特殊功能寄存器地址范围 0x80~0xFF 之间。

例如：

```
sfr SCON=0x90;    /*串口控制寄存器地址 90H*/  
sfr16 T2=0xCC;    /*80C52 的 T2L 地址为 0xCC,T2H 地址为 0xCD*/
```

### 2. 特殊功能寄存器位的声明

特殊位的定义利用关键字 sbit 进行说明，与 sfr 定义一样，用关键字“sbit”定义某些特殊位时能接受任何符号名称，这种地址分配有 3 种方式。

第一种方式：sbit 位变量=特殊功能寄存器名^位位置 (0~7 有效)。例如：

```
sfr PSW=0xD0;    /*定义 PSW 寄存器地址为 0xD0*/  
sbit OV=PSW^2;   /*定义 OV 位为 PSW.2 地址为 0xD2*/
```

第二种方式：sbit 位变量名=字节地址^位位置 (0~7)。例如：

```
sbit OV=0xD0^2;  /*OV 位地址为 0xD2*/
```

这种方法以一个整常数作为基地址，该值必须在 0x80~0xFF 之间，并能被 8 整除。

第三种方式：sbit 位变量名=位地址。这种方法将位的绝对地址赋给变量，地址必须位于 0x80~0xFF 之间。例如：

```
sbit OV=0xD2;
```

## 6.3 C51 的运算符和表达式

运算符就是完成某种特定运算的符号，按运算符在表达式中与运算对象的数量可分为单目运算符、双目运算符和三目运算符。单目就是指需要有一个运算对象，双目就要求有两个运算对象。表达式则是由运算及运算对象所组成的具有特定含义的式子。

### 6.3.1 赋值运算符

“=”符号在 C 中的功能是给变量赋值，称为赋值运算符。它的作用就是将数据赋给变量。使用“=”的赋值语句格式为：

变量=表达式;

例如：

```
a=0xFFH;        //将常数十六进制数 0xFFH 赋于变量 a  
b=c=33;         //同时将 33 赋值给变量 b,c
```

```
d=e;           //将变量 e 的值赋于变量 d
f=a+b;         //将变量 a+b 的值赋于变量 f
```

由上面的例子可以知道，赋值语句的意义就是先计算出“=”右边的表达式的值，然后将得到的值赋给左边的变量。而且右边的表达式可以是一个赋值表达式。

注意：初学者容易将赋值符号“=”与后面的关系运算符“==”（相等）混淆。

### 6.3.2 算术运算符

对于  $a+b$ 、 $a/b$  这样的表达式大家都很熟悉，其中“+”和“/”就是 C 语言中的算术运算符。C51 中的算术运算符有如下几个：

+	加或取正值运算符	-	减或取负值运算符		
*	乘运算符	/	除运算符	%	取余运算符

以上几个运算符中只有取正值和取负值运算符是单目运算符，其他则都是双目运算符。

算术表达式的形式：表达式 1 算术运算符 表达式 2

算术运算符的优先级：先乘除模，后加减，括号最优先。

算术运算符的结合性：算术运算符的结合性规定为自左至右方向，又称为“左结合性”。即当一个运算对象两侧的算术运算符优先级别相同时，运算对象先与左面的运算符结合。

例如：

$a+b*(10-a)$ ：将  $10-a$  的结果与  $b$  相乘，再和  $a$  相加；

$a+b-c$ ：式中， $b$  两边是“+”和“-”运算符，因为优先级别相同，按左结合性先执行  $a+b$  再与  $c$  相减。

注意：除法运算符和一般的算术运算规则有所不同，如果是两浮点数相除，其结果为浮点数，如  $10.0/20.0$  所得值为 0.5，而两个整数相除时，所得值就是整数，如  $7/3$  的值为 2。

### 6.3.3 关系运算符

C51 中有 6 种关系运算符：

>大于	} 优先级 相同(高)	} 优先级 相同(低)
<小于		
>=大于等于		
<=小于等于		

== 等于	} 优先级 相同(低)
!= 不等于	

当两个表达式用关系运算符连接起来时就构成了关系表达式，关系运算符的运算结果只有 0 和 1 两种，也就是逻辑的“真”与“假”。关系表达式通常用来判别某个条件是否满足，当指定的条件满足时结果为 1（真），不满足时结果为 0（假）。

关系运算符的优先级别：前 4 个具有相同的优先级，后两个也具有相同的优先级，但是前 4 个的优先级要高于后两个。

例如，若  $a=4$ ， $b=3$ ， $c=2$ ，则：

$a>b$  的值为“真”，表达式值为 1；

$b+c<a$  的值为“假”，表达式值为 0；

$f=a>b>c$ ，由于关系运算符的结合性为左结合，故  $a>b$  值为 1。而  $1>c$  位为 0，故  $f$  值为 0。



### 6.3.4 逻辑运算符

关系运算符所能反映的是两个表达式之间的大小等于关系，而逻辑运算符则是用于求条件式的逻辑值，逻辑运算结果只有真与假两种。C51 提供 3 种逻辑运算符：

&&：逻辑与（AND）    ||：逻辑或（OR）    !：逻辑非（NOT）

“与”逻辑和“或”逻辑是双目运算符，而“非”逻辑是单目运算符。

逻辑运算符优先级：逻辑非最高，逻辑与次之，逻辑或最低。

C51 逻辑运算符、算术运算符、关系运算符和赋值运算符之间优先级的次序如图 6.1 所示。其中，！（非）运算符优先级最高，算术运算符次之，关系运算符再次之，与和或再次之，最低为赋值运算符。

例如，a=1，b=2，c=3，d=4，m=0，n=0，则：

m=a>b: 因为 a>b 为假(0)，即 m=0。

m=c<d: 因为 c<d 为真(1)，即 m=1。

m==c<d: 因为==运算符的优先级比<运算符的低，所以先判断 c<d 为真(1)，而 m 等于 0，两者不相等，故表达式的值为假(0)。

(m==a>b)&&(n==c>d): 因为 a>b 为假(0)，即 m==0 为真(1)，故需继续向右执行，又因为 c>d 为假(0)，即 n==0 为真(1)，两者相与结果为真(1)，故表达式值为 1。

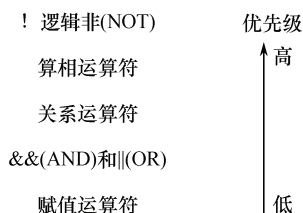


图 6.1 常用运算符的优先级

### 6.3.5 位运算符

汇编语言对位的处理能力是很强的，但是 C51 语言也能对运算对象进行按位操作，从而使 C51 语言也具有对硬件直接进行操作的能力。位运算符的作用是按位对变量进行运算，但是并不改变参与运算和变量的值。C51 中共有 6 种位运算符。

& 按位与    | 按位或    ^ 按位异或    ~ 按位取反    <<位左移    >>位右移

位运算一般的表达式为：

变量 1 位运算符 变量 2

位运算符的优先级：6 种位运算的优先级从高到低依次是：~（按位取反）→<<（左移）→>>（右移）→&（按位与）→^（按位异或）→|（按位或）。

除了按位取反运算符以外，以上位操作运算符都是双目运算符，位运算符对象只能是整型或字符型数据，不能为实型数据。

例如，a=0xff，b=0x01，则

c=a & b: c=0x01

c=a | b: c=0xff

c=a^b: c=0xfe

c=~a: c=0x00

c=a>>b: c=0x7f

### 6.3.6 其他运算符

#### 1. 条件运算符

C51 中有一个三目运算符，它就是条件运算符“?”。条件运算符要求有 3 个运算对象，它可以把 3 个表达式连接构成一个条件表达式。条件表达式的一般形式如下：

逻辑表达式? 表达式 1: 表达式 2;

条件运算符的作用就是根据逻辑表达式的值选择使用表达式的值。当逻辑表达式的值为真（1）时，整个表达式的值为表达式 1 的值；当逻辑表达式的值为假（0）时，整个表达式的值为表达式 2 的值。

例如，要求将 a 和 b 两数中的较小的值放入 min 变量中，下列两个程序效果相同。

程序 1:

```
if(a<b)
min = a;
else
min = b;
```

程序 2:

```
min =(a<b)?a:b;
```

很明显两个程序的结果是一样的，程序 2 比程序 1 的代码却少很多，编译的效率也相对要高，但可读性相对较差。

## 2. 指针和地址运算符

指针类型是一种存放指向另一个数据的地址的变量类型。指针是 C 语言中一个十分重要的概念，也是学习 C 语言的一个难点，关于指针将在后续章节中会做详细讲解，在这里先来了解一下 C 语言中提供的两个专门用于指针和地址的运算符：

\* 取内容

& 取地址

取内容和地址的一般形式分别为：

变量 = \*指针变量

指针变量 = &目标变量

取内容运算是将指针变量所指向的目标变量的值赋给左边的变量；取地址运算是将目标变量的地址赋给左边的指针变量。要注意的是：指针变量中只能存放地址（也就是指针型数据），一般情况下不要将非指针类型的数据赋值给一个指针变量。

## 3. sizeof 运算符

sizeof 是用来求数据类型、变量或是表达式的字节数的一个运算符，但它并不像“=”之类运算符那样在程序执行后才能计算出结果，它是直接在编译时产生的结果。它的语法如下：

```
sizeof(表达式)
```

例如：

```
printf("char 是多少个字节? 字节\n",sizeof(char));
printf("long 是多少个字节? 字节\n",sizeof(long));
```

结果是：

```
char 是多少个字节? 1 字节
long 是多少个字节? 4 字节
```

## 4. 自增减运算符

自增减运算符的作用是使变量值自动加 1 或减 1。自增减运算有 4 种形式：

++i, --i （在使用 i 之前，先使 i 值加(减)1）

i++, i-- （在使用 i 之后，再使 i 值加(减)1）

例如，若 i 值原来为 5，则：

j=++i, j 值为 6, i 值也为 6

j=i++, j 值为 5, i 值为 6

## 5. 复合赋值运算符

复合赋值运算符就是在赋值运算符“=”的前面加上其他运算符。以下是 C51 中常用的几种复合赋值运算符：

+= 加法赋值	>>= 右移位赋值	-= 减法赋值	&= 逻辑与赋值
*= 乘法赋值	= 逻辑或赋值	/= 除法赋值	^= 逻辑异或赋值
%= 取模赋值	!= 逻辑非赋值	<<= 左移位赋值	

复合运算的一般形式为：

变量 复合赋值运算符表达式

其含义就是变量与表达式先进行运算符所要求的运算，再把运算结果赋值给参与运算的变量。其实这是 C51 语言中一种简化程序的方法，凡是二目运算都可以用复合赋值运算符去简化表达。例如：

a+=56 等价于 a=a+56

y/=x+9 等价于 y=y/(x+9)

a\*=b 等价于 a=a\*b

显然，采用复合赋值运算符会降低程序的可读性，但这样却可以使程序代码简单化，并能提高编译的效率。对于初学 C51 语言的读者，在编程时最好还是根据自己的理解力和习惯去使用程序表达的方式。

## 6. 强制类型转换运算符

强制类型转换运算符的作用就是将表达式或者变量的类型强制转换成为所要求的类型。在 C51 中有两种数据类型转换方式：一种是隐式转换，另一种是显式转换。例如：

```
void main(void)
{
    unsigned char a;
    unsigned int b;
    b=100*4;
    a=b;
    while(1);
}
```

b=100\*4 就可以得知 b=0x190，然而 a 的值为 0x90，也就是 b 的低 8 位。因为 b 是 int 型，a 是 char 型数据，只能存储 8 位，所以在将 b 赋值给 a 时执行了数据类型的隐式转换。隐式转换在对程序进行编译时是由编译器自动处理的，隐式转换有以下规则：

① 因为 char 类型不能运算，所以先将所有的 char 类型的操作数转换成为 int 类型，然后再依据另一个数据的类型进行相应的变换，变换原则参照第二条。

② 当不同类型的两个操作数进行运算时，转换类型以提高运算精度为原则。

当整型数据和浮点型数据进行运算时，将整型数据转换成浮点型数据，再进行运算，结果为浮点型数据；当字符型数据和整型数据进行运算时，将字符型数据转换成整型数据，然后进行计算，结果为整型数据。

③ 如果强制类型转换运算符连接的两个数据是对变量的赋值，则仅将赋值号右边的表达式类型转换成为赋值号左边的类型。

在 C51 中只有 char, int, long 及 float 这几种基本的数据类型可以被隐式转换，而其他的数据类型就只能用到显示转换。

显式转换运算符的表达形式:

(类型) 表达式

例如:

```
main()
{
    unsigned char a;
    unsigned long b;
    a=5;
    b=((unsigned long)a)*10000;
}
```

上例程序中, 首先把 **a** 转换为可以存储 **5\*10000** 的数据类型, 得到的结果才会正确。用显示类型转换来处理不同类型的数据间运算和赋值是十分方便的, 特别对指针变量赋值很有用。

## 6.4 C51 流程控制语句

C51 程序通常有顺序结构、选择结构和循环结构 3 种类型。考虑到顺序结构比较简单, 在此不做介绍, 下面针对选择结构和循环结构常用的条件语句、循环语句和开关语句分别介绍。

### 6.4.1 条件语句

条件语句由关键字 **if** 构成, 通常 **if** 后面为条件判断, 其一般形式为:

```
if(表达式)
    {语句 1;}
else
    {语句 2;}
```

如果表达式的值为非 0 (TURE), 则执行语句 1, 执行完语句 1 后跳过语句 2 开始继续向下执行; 如果表达式的值为 0 (FALSE), 则跳过语句 1 而执行语句 2。表达式可以为关系表达式和逻辑表达式的结合式。其流程图如图 6.2 所示。

特殊说明:

- ① 条件执行语句中 “else 语句 2” 部分为可选项。
- ② 如果语句 1 或语句 2 有多于一条语句要执行时, 必须使用 “{}” 把所有语句包括在其中。
- ③ 条件语句可以嵌套, 嵌套时 **else** 语句与最近的一个 **if** 语句匹配, 同时为了提高程序的可读性, 通常要求利用缩进方式将层次感写出来。
- ④ 可用阶梯式 **if-else-if** 结构。阶梯式结构的一般形式为:

```
if(表达式 1)        语句 1;
else if(表达式 2)    语句 2;
else if(表达式 3)    语句 3;
else                 语句 n;
```

这种结构是从上到下逐个对条件进行判断, 一旦发现条件满足就执行与它有关的语句, 并跳过其他剩余阶梯; 若没有一个条件满足, 则执行最后一个 **else** 语句 **n**。

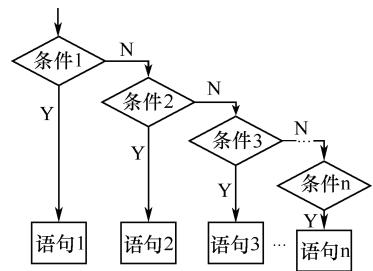


图 6.2 if 语句

## 6.4.2 循环语句

C51 中实现循环的方式主要有 for、while 和 do-while 这 3 种基本语句。

### 1. for 循环

for 循环是开界的，它的一般形式为：

for(<初始化>; <条件表达式>; <更新表达式>) 语句;

初始化一般是一个赋值语句，它用来给循环控制变量赋初值；条件表达式是一个关系表达式，它决定什么时候退出循环；更新表达式说明循环控制变量每循环一次后按什么方式变化，若更新后条件表达式为假（False）则退出循环。其流程图如图 6.3 所示。例如：

```
for(i=1; i<=10; i++)  
{语句 n; }
```

上例中先给 i 赋初值 1，判断 i 是否小于等于 10，若条件为真则执行语句，之后 i 值增加 1，再重新判断，直到条件为假（i>10）时结束循环。

注意：

- ① for 循环中语句可以为语句体，但要用“{}”将参加循环的语句括起来；
- ② for 循环中的初始化、条件表达式和更新表达式都是选择项，可默认，但分号“;”不能默认；
- ③ for 循环可以多层嵌套。

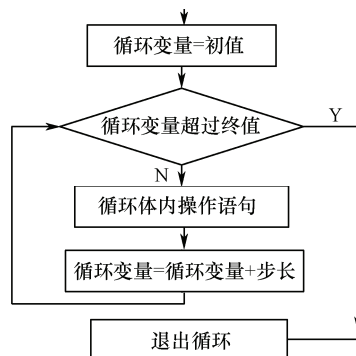


图 6.3 for 循环语句

### 2. while 循环

while 循环的一般形式为：

while(条件) 语句;

若 while 循环条件为真时，则执行语句，为假则循环结束。与 for 循环一样，while 循环总是在循环的开始检验条件，如果一开始条件就不满足，则意味着循环语句可能一次也不执行就退出。其流程图如图 6.4 所示。

注意：

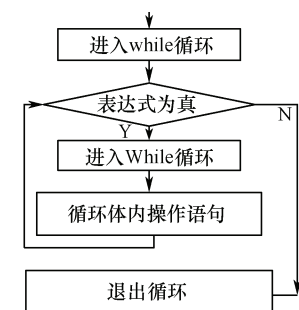


图 6.4 while 循环语句

- ① 在 while 循环体内允许空语句；

- ② 可以有多层循环嵌套；

- ③ 语句可以是语句体，此时必须用“{}”括起来；

④ 当条件恒为真时，则程序进入一个死循环，单片机系统中经常利用这一特性实现前后台系统的调用。

### 3. do-while 循环

do-while 循环的一般格式为：

```
do  
    语句;  
while(条件);
```

该循环与 while 循环的不同在于它先执行循环中的语句，然后再判断条件是否为真，如果为真则继续循环，如果为假，则终止循环。因此，do-while 循环至少要执行一次循环语句。其流程图如图 6.5 所示。

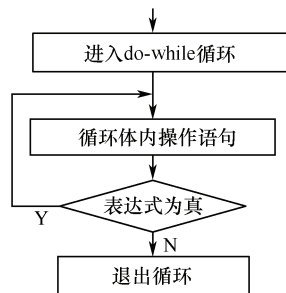


图 6.5 do-while 循环语句

### 6.4.3 开关语句

在编写程序时，经常会碰到按不同情况多路分转的问题，这时可用开关语句。开关语句格式为：

```
switch(变量)
{
case 常量 1:
    语句 1;
    break;
case 常量 2:
    语句 2;
    break;
    ⋮
case 常量 n:
    语句 n;
    break;
default:
    语句 n+1;
    break;
}
```

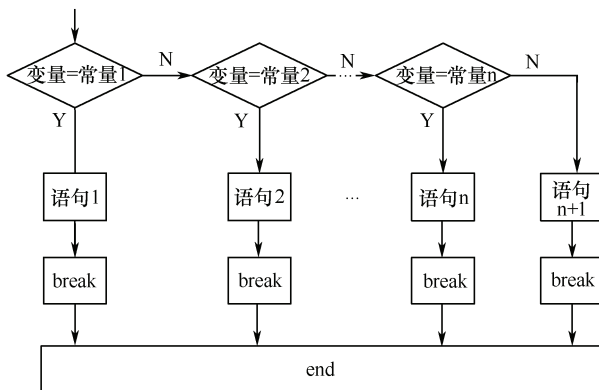


图 6.6 switch 语句

执行 switch 开关语句时，将变量逐个与 case 后的常量进行比较，若与其中一个相等，则执行该常量下的语句，若不与任何一个常量相等，则执行 default 后面的语句。其流程图如图 6.6 所示。

注意：

- ① switch 中变量可以是数值，也可以是字符；
- ② 可以省略一些 case 和 default；
- ③ 每个 case 或 default 后的语句可以是语句体，同样要使用“{}”括起来。

### 6.4.4 break、continue 和 goto 语句

#### 1. break 语句

break 语句可以跳出循环而执行循环后面的语句，通常用在循环语句和开关语句中配合使用。

当 break 用于开关语句 switch 中时，可使程序跳出 switch 而执行 switch 以后的语句；如果没有 break 语句，则将成为一个死循环而无法退出。

当 break 语句用于 for、do-while、while 循环语句中时，可使程序终止循环而执行循环后面的语句，通常 break 语句总是与 if 语句连在一起，即满足条件时便跳出循环。

#### 2. continue 语句

continue 语句的作用是跳过本次循环中剩余的语句而强行执行下一次循环。这是与 break 语句的最大差别。continue 语句通常只用在 for、while、do-while 等循环体中，常与 if 条件语句一起使用，用来加速循环。

#### 3. goto 语句

goto 语句是一种无条件转移语句。goto 语句的使用格式为：

goto 标号;

其中，标号是一个有效的标识符，这个标识符加上一个“:”一起出现在函数内某处，执行 goto

语句后，程序将跳转到该标号处并执行其后的语句。另外，标号必须与 goto 语句同处于一个函数中，但可以不在一个循环层中。在编程时 goto 语句要尽量少用，因为它将使程序层次不清，但在多层嵌套退出时，用 goto 语句则比较合理。

## 6.5 C51 的构造数据类型

字符型 (char)、整型 (int) 和浮点型 (float) 等属于基本数据类型，除此之外，C51 还提供了一些扩展的数据类型，统称为构造数据类型。数组、指针、结构、枚举都是常见的构造数据类型。

### 6.5.1 数组

数组是一组具有固定数目和相同类型成分分量的有序集合，其成分分量的类型为该数组的基本类型。常用的有整型数组、字符型数组等。数组的各元素必须是同一类型的变量。

#### 1. 数组的定义

数组是用同一个名字的不同下标访问的，数组的下标放在方括号中，是从 0 开始的一组有序整数。例如数组 b[i]，当 i=0, 1, 2, ..., n 时，b[0], b[1], ..., b[n] 分别是数组 b 的元素。依据数组的下标个数可分为一维、二维和 multidimensional 数组，其中一维和二维数组是常用的数组形式。

一维数组：一维数组的下标只有一个，其定义格式如下：

类型说明 [存储器类型] 数组名[整型] [= {初始值}]

例如：

```
char a[6]={"shiwei"}; /*字符数组 a[0]='s', ...,a[5]='i'*/
```

```
int idata b[5]={0,1,2,3,4}; /*字符数组 b 存储于片内 RAM,且 b[0]=0,...,b[4]=4 */
```

二维数组：二维数组的下标只有两个，其定义格式如下：

类型说明 [存储器类型] 数组名[整型][整型] [= {初始值}]

二维数组的存取顺序是按行存取，即先依次存取第 1 行元素的所有列，再存储第 2 行，依此类推。

例如：

```
int a[2][2]={1,2,3,4}/*整型数组 a 有 4 个元素,且 a[0][0]=1, a[0][1]=2, a[1][0]=3, a[1][1]=4*/
```

二维数组的初始化有多种形式，下面的初始化结果是等效的：

```
int a[2][2]={{1,2},{3,4}};
```

```
int a[2][2]={1,2,3,4};
```

#### 2. 数组的应用

在实践应用中经常希望单片机、控制器能对大量的数据进行高精度的数学运算，而在单片机控制系统中，人们更愿意采用查表的方式予以实现，因为表格查找执行速度快，所用代码少。而查表的过程中就需要运用数组。

**【例 6.1】** 设单片机的 P0 引脚和数码管代码段相连，P1.0 和数码管公共段相连（共阴极），电路连接如图 6.7 所示。请在数码管上依次显示 0~9 个数字，显示时间间隔为 1s，试利用数组编写程序。

```
#include<reg51.h>
#define uint unsigned int
int code table[]={0x3f,0x06,0x5b,0x4f,0x66,0x6d,0x7d,0x07,0x7f,0x6f};
void delay(uint xms)
```

```

{
    uint i,j;
    for(i=xms;i>0;i--)          //i=xms 即延时约 xms 毫秒
        for(j=110;j>0;j--);
}
void main()
{
    uint i;
    for(i=0; i<=9; i++)        /*数组的访问下标从 0 开始*/
    {
        P1=0xff;                /*消隐*/
        P0=table[i];            /*段译码*/
        P1=0xfe;                /*使能*/
        delay(1000);            /*延时 1s*/
    }
}

```

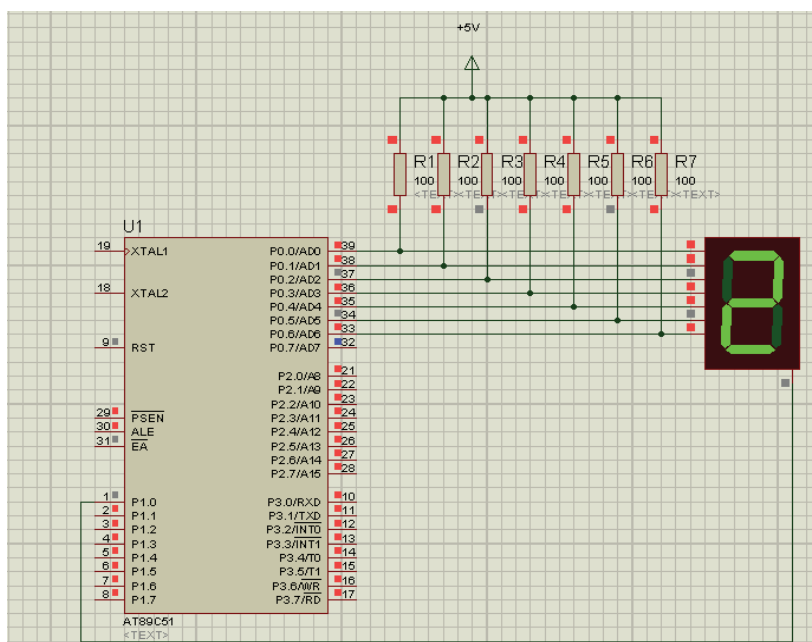


图 6.7 电路连接及仿真效果图

## 6.5.2 指针

指针是 C51 语言中的一个重要概念，使用指针可以有效表示和使用复杂的数据结构。指针就是指变量或数据所在的存储区的地址，它为变量的访问提供了一个特殊的方式。

### 1. 指针的基本概念

为了了解指针的基本概念，必须了解数据在内存中是如何存储和读取的。如果程序中定义了一个变量，C51 编译器在编译时就给这个变量在内存中分配相应的存储空间。变量有变量名和变量值两个概念，其中变量名是数据的标号，变量值则是数据的内容。

内存单元也有两个概念，一个是内存单元的地址，另一个是内存单元的内容。前者是内存对该单元的编号，它表示在内存中的位置。后者指的是在该内存单元中存放的数据。



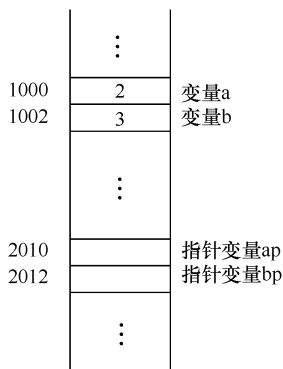


图 6.8 指针变量

在变量与内存单元的对应关系中，变量的变量名与内存单元的地址相对应。变量的变量值与内存单元的内容相对应。

假设程序中定义了两个整型变量 **a** 和 **b**，它们的值分别为 2、3，而 C51 编译系统将地址为 1000 和 1001 的两字节内存单元分配给了变量 **a**，将地址为 1002 和 1003 的两字节内存单元分配给了变量 **b**，则变量 **a** 和 **b** 的地址为 1000 和 1002，其指针对应关系如图 6.8 所示。在内存中变量名 **a**、**b** 是不存在的，对变量值的存取是通过地址进行的。存取的方式有两种。

一种是直接访问方式。例如，**x=a**，其执行过程是这样的：根据变量名与内存单元地址的对应关系，找到变量 **a** 在内存中的位置，即地址 1000，然后由地址 1000 开始的两字节中取出 2 并赋给 **x**。这种访问方式就是直接访问方式。

第二种是间接访问方式。例如：

```
char data *bp;          /*定义指针变量 bp */
bp=&b;                  /*将 b 的地址赋给指针变量 bp*/
X=*bp;                 /*将 b 的内容 3 送给 X*/
```

要读取变量 **b** 的值时，可以将变量 **b** 的地址放在另一个内存单元中（如放在 2012、2013 中），访问时，先找到存放变量 **b** 的地址的内存单元的地址（2012、2013），然后从中取出变量 **b** 的地址（1002），然后从地址为（1002、1003）的两字节内存单元中取出变量 **b** 的值 3。这种访问方式就是间接访问方式。该读取过程中就使用了指针。

为了使用指针进行间接访问，必须弄清关于指针的两个基本概念，即变量的指针和指向变量的指针变量（简称指针变量）。

**变量的指针：**变量的指针就是变量的地址。对于上面提到的变量 **a** 而言，其指针就是 1000。

**指向变量的指针变量：**若有一个变量专门用来存放另一个变量的地址（即指针），则该变量称为指向变量的指针变量（简称指针变量）。上例中提到的地址为 2010 的内存单元，如果定义一个变量 **ap**，并使其定位在地址为 2010 的这个内存单元上，则 **ap** 就是一个指针变量。因为 **ap** 中（即地址单元 2010 中）存放着变量 **a** 的地址 1000。

上例中可以说变量 **a** 的指针（地址）为 1000，不能说 **a** 的指针变量是 1000。变量 **a** 的指针变量应该是 **ap**，**ap** 的指针是 2010。

## 2. 指针的基本类型

变量的指针就是变量的地址，用取地址运算符“&”取得。语句 **ap=&a** 能把所取得的 **a** 指针（地址）存放在 **ap** 指针变量中，**ap** 的值就变为 1000H。可见指针变量的内容是另一个变量的地址。指针定义的一般的格式如下：

数据类型 [指向对象的存储器类型] \* [指针存储器类型] 变量名;

### (1) 一般指针类型

当指向对象的存储类型默认时指针变量为一般类型，一般指针占用 3 字节，第一个字节存放指针的存储类型编码，第二、三个字节分别存放指针的高位和低位的地址。存储类型编码见表 6.4。

表 6.4 一般指针的存储类型编码表

存储类型	data/bdata/idata	xdata	pdata	code
编码	0x00	0x01	0xfe	0xff

例如：

```
char * xdata pi
```

指针 **pi** 本身存于 **xdata** 空间，它指向 **char** 型数据，任何区域的对象都可以赋值给它，第一字节为 **0x01**，其余字节为地址。

由于指针变量的指向对象没有确定存储位置，所以在编译时不能确定对象的存储位置，只能在程序运行时才能确定，故程序运行速度比较慢，但由于一般指针可以存储任何变量而不必考虑变量在单片机的存储位置，所以在单片机编程时绝大多数的指针都可采用一般指针形式。

### (2) 基于存储器的指针类型

当指向对象的存储器类型默认时，指针变量为基于存储器的指针类型。由于不必为指针选择存储器，指针的长度可以为 1 字节 (**idata**, **data**, **pdata**) 或 2 字节 (**code**, **xdata**)。例如：

```
char data * xdata pi;
```

指针 **pi** 本身存于 **xdata** 空间，它指向 **char** 型数据，且只能将 **data** 区域的对象赋值给 **pi**，**pi** 只占用 1 字节。

```
char xdata * pi;
```

指针 **pi** 本身存于任意空间，它指向 **char** 型数据，但只能将 **xdata** 区域的对象赋值给它，**pi** 占用 2 字节。

明确定义指针对象的存储类型可以高效访问对象，还能节省存储器的开销，这在严格要求程序体积的项目中很有用处，但只能将符合定义条件的变量赋值给它，兼容性较差，初学者要慎用。

## 3. 指针的应用

指针变量中只能存放指针型数据（即地址），不能将非指针型数据赋值给一个指针变量。如果有一个变量 **a**，则可以利用 **&a** 表示变量 **a** 的地址，如果执行以下语句 **P=&a**；则表示将 **a** 的地址赋给了指针变量 **P**，即 **P** 指向了变量 **a**。为了获取指针所指向的内容，可利用指针运算符“\*”来实现。例如：

```
char data *P;          /*定义指针变量 P 为 char 类型,且指向 data 存储器*/
P=&a;                  /*将 a 的地址赋给指针变量 P,a 的地址为片内 RAM 区*/
X=*P;                  /*将 a 的地址的内容送给 X*/
```

## 6.5.3 结构

结构是 C 语言的特点之一，它可将字符、整型、浮点等简单数据类型按层次产生各种构造数据类型。这些组合在一起的数据是互相关联的，这种按固定模式聚集在一起而构成的数据就是结构。例如：

```
#include <reg51.h>
struct
{
    float amplitude;
    int frequency;
    int offset;
} waveform; /*结构体定义*/
main()
{
    int a[sizeof(waveform)];
```

```

unsigned char *ptr=&waveform;
unsigned char i;
waveform.amplitude=1; /*结构体赋值*/
waveform.frequency=2; /*结构体赋值*/
waveform.offset=3; /*结构体赋值*/
for(i=0;i<sizeof(waveform);i++)
a[i]=*(ptr+i); /*将结构体的值分别存储到数组 a 中*/
}

```

显然，结构体数据利用指针和数组就可以将数据读出来，当然也可以将这些数据保存到对应的存储区。

结构的定义和使用主要有以下几点：

- ① 将有共同属性的一组变量放在一个结构体里，既可方便理解和规范编程，也有利于程序的移植和维护；
- ② 用结构可以分配一连续内存，方便与指针结合起来使用；
- ③ 同一结构中不同分量不能同名。

### 6.5.4 枚举

枚举是一个被命名的整型常数的集合，枚举在日常生活中很常见。例如，表示星期的 SUNDAY, MONDAY, TUESDAY, WEDNESDAY, THURSDAY, FRIDAY, SATURDAY，就是一个典型的枚举类型。枚举的说明与结构体相似，其形式为：

```

enum 枚举名{
    标识符[=整型常数],
    标识符[=整型常数],
    标识符[=整型常数],
}枚举变量;

```

如果枚举没有初始化，即“=整型常数”部分默认，则从第一个标识符开始，顺次赋给标识符 0, 1, 2，但当枚举中的某个成员赋值后，其后的成员按依次加 1 的规则确定其值。例如：

```

enum string
{x1,x2,x3=50,x4};

```

则 x1=0, x2=1, x3=50, x4=51。

注意：

- ① 枚举中每个成员间用逗号隔离，不是分号，且最后一个逗号可省略；
- ② 初始化时可以赋负数，以后的标识符仍依次加 1；
- ③ 枚举变量只能取枚举说明结构中的某个标识符常量。

## 6.6 C51 的函数

C51 和标准 C 语言一样也是由很多模块化的函数构成的。一般功能较多的程序会在编写程序时把每项单独的功能分成数个子程序模块来实现，每个子程序都能用函数调用来实现。因此一些常用的函数常做成函数库以供编写程序时直接调用，从而提高编程工作的效率。当然，main()也算是一个函数，只不过它比较特殊，编译时以它作为程序的开始段。

C51 函数分为两大类，一类是库函数，另一类是用户自定义函数，这与标准 C 是一样的。

库函数是 C51 在库文件中已定义的函数，其函数说明在相关的头文件中。对于这类函数，用户在编程时只要用 `#include` 预处理指令将头文件包含在用户文件中就可直接调用。用户函数是用户自己定义和调用的一类函数。

一个函数在程序中可以有 3 种形态：函数定义、函数调用和函数说明。函数定义和函数调用不分先后，但若调用的函数在定义之前，那么在调用前必须先进行函数说明。函数说明是一个没有函数体的函数定义，而函数调用则要求有函数名和实参数表。

例如：

```
#include <reg51.h> // 使用 include 预处理伪指令将所需库函数包含进来
unsigned int z; // 变量定义
int max(x,y); // 函数说明
unsigned int a=2;
unsigned int b=3;
main()
{
    while(1)
    {
        z=max(a,b); // 函数调用
    }
}
int max(x,y) // 函数定义
{
    if(x>y)
        return x;
    else
        return y;
}
```

### 6.6.1 C51 函数定义

虽然 C 语言的编译器会自带标准的常用函数库，这些函数在使用时无须定义（但要说明）就可以直接调用，但是标准的函数不足以满足使用者的特殊要求，因此 C51 允许使用者根据自身需要编写特定功能的函数，函数定义的形式如下：

```
函数返回值类型 函数名(形式参数)
{
    函数体
}
```

函数返回值其实就是一个变量，只要按变量类型来定义函数类型就行。函数体返回值的类型一定要和函数类型一致，否则会造成错误。如果函数不需要返回值，应用关键字“`void`”明确表示。

函数名的定义在遵循 C 语言变量命名规则的同时，不能在同一程序中定义同名的函数。

形式参数是指调用函数时要传入到函数体内参与运算的变量，它可以有多个或没有，没有形式参数时括号内为空，但括号不能少。

函数体中能包含局部变量的定义和程序语句，若函数要返回运算值，则要使用 `return` 语句进行返回。

在函数体{}中可以没有任何语句的函数，称为空函数。在一个程序项目中能写一些空函数，在以后的修改和升级中能方便地利用这些空函数中进行功能扩展。

例如：

```
int max(x,y) // 函数定义
{
    if(x>y)
        return x;
    else
        return y;
}
```

该函数的名称为 max，函数返回值类型为 int，x 和 y 是函数的形式参数。

### 6.6.2 C51 函数调用

函数定义好以后，要被其他函数调用了才能被执行。C 语言函数是能相互调用的，但在调用函数前，必须对函数的类型进行说明，就算是标准库函数也不例外。函数调用是指一个函数体中引用另一个已定义的函数来实现所需要的功能，函数体称为主调用函数，函数体中所引用的函数称为被调用函数。一个函数体中能调用数个其他的函数，这些被调用的函数同样也能调用其他函数，甚至嵌套调用。调用函数的一般形式如下：

函数名 (实际参数表);

函数名就是指被调用的函数名。若被调用函数有参数，则主调函数必须把被调函数所需的参数传递给被调函数的参数，即实参，实参向形参的传递是单向的，且实参的类型、位置应与形参一一对应，否则就会产生错误。

```
main()
{
    while(1)
    {
        z=max(a,b);//函数调用
    }
}
```

max 函数调用时 a 和 b 为实际参数，其实际参数和形式参数的对应关系为：a=>x，b=>y。

### 6.6.3 混合编程简介

C51 编译器能对 C 语言源程序进行高效率的编译，生成高效简洁的代码，在绝大多数场合采用 C 语言编程即可完成预期的目的。但有时为了编程直观或某些特殊地址的处理，还须采用一定的汇编语言编程。而在另一些场合，出于某种目的，汇编语言也可调用 C 语言。在这种混合编程中，首先要了解 C51 函数名和汇编函数名之间的转换规律，其次要明白函数间参数的传递原则，否则函数调用过程中就可能出错。

#### 1. C51 函数名的转换

在 Keil C51 中，编译器对 C 语言程序中的函数会自动地进行转换，转换规则见表 6.5。

#### 2. C51 函数名和段属性的命名规则

利用函数调用进行混合编程时需对 Keil 编译器的编译过程做些了解。Keil 编译器的编译过程是：首先将项目中的源文件编译为目标代码(.obj 文件)，然后在再通过连接器产生为最终可执行的 hex 文件。其中，目标代码将其中的代码、数据、常量放在不同的“段”中，保存

程序的段称为“代码段”，保存数据的段称为“数据段”，最终目标代码经过 Keil 的连接器按照“段”的要求转换为程序和数据地址固定的可执行文件。“段”按定位属性分为：“可重定位段”和“绝对段”。

表 6.5 混合编程函数转换规则

C51 函数名称	转换后的函数名称	说 明
void func1 (void)	func1	无参数传递的函数
void func2 (int)	_func2	通过寄存器传递参数的函数
void func3 (char) reentrant	__func3	可重入函数固定存储位置传递参数的函数

可重定位段：程序和数据在其分别所对应的存储单元（FLASH 和 RAM）中的存储地址是浮动的、可重定义的、相对可变的。

绝对段：其地址在连接前就已确定不变，连接器据此为它分配地址。

段的命名格式随存储器模式的不同有所变化，其命名规则见表 6.6。

表 6.6 段命名规则

段内容	段类型	段名
程序代码	CODE	?PR?函数名?模块名
变量	DATA	?DT?函数名?模块名（SMALL 模式）
	PDATA	?PD?函数名?模块名（COMPACT 模式）
	XDATA	?XD?函数名?模块名（LARGE 模式）
BIT 型变量	BIT	?BI?函数名?模块名

3. C51 函数参数传递和返回

在 C51 函数和汇编函数相互调用时经常要进行参数传递，常用的参数传递方式有寄存器传递和固定存储器位置传递两种方式。

寄存器参数传递：寄存器参数传递指参数通过寄存器 R1~R7 来传递的，这种形式可产生高效的代码，利用 51 单片机的工作寄存器最多传递 3 个参数，具体对应传递方式见表 6.7。

表 6.7 寄存器参数传递对应的寄存器

传递参数	char、1 字节指针	int、2 字节指针	long、 float	一般指针
参数 1	R7	R6, R7	R4~R7	R1, R2, R3
参数 2	R5	R4, R5	R4~R7	R1, R2, R3
参数 3	R3	R2, R3	无	R1, R2, R3

固定存储位置参数传递：当无寄存器可用或是采用了编译控制指令“NOREGPARMS”，则参数的传递将发生在固定的存储器区域，该存储器区域称为参数传递段，其地址空间取决于编译时所选择的存储器模式。在 SMALL 模式下参数传递在内部 RAM 中完成，在 COMPACT 和 LARGER 模式下参数传递要在外部 RAM 中完成。

例如：

Fun1(int a): a 是第一个参数，在 R6, R7 中传递。

Fun2(int b,int c,int \*d): b 在 R6, R7 中传递，c 在 R4, R5 中传递，\*d 则在 R1, R2, R3 中传递。

混合编程有时还要进行参数返回，在函数或子程序返回时，依据返回数据的类型不同有较大的差别，具体规则见表 6.8。

表 6.8 混合编程返回值规则

返回类型	所用寄存器	返回类型	所用寄存器
bit	C 累加器	char, 1 字节指针	R7
long	R4~R7	int, 2 字节指针	R6、R7
float	R4~R7	一般指针	R1~R3

## 6.6.4 混合编程形式

混合编程主要有 C51 内嵌汇编代码和 C51 调用汇编函数两种形式。

### 1. C51 内嵌汇编代码

因为 Keil 是应用非常普遍的编译软件，下面就以实际操作为例进行说明。要实现在 C51 函数中直接加汇编代码，需要注意以下几个方面。

① 将要嵌入的汇编语句以如下方式加入：

```
#pragma ASM
;Assembler Code Here
#pragma ENDASM
```

② 在 Project 窗口中右击包含汇编代码的 C 文件，选择“Options for ...”选项，然后单击右边的“Generate Assembler SRC File”和“Assemble SRC File”选项，使选择框由灰色变成黑色状态。

③ 根据选择的编译模式，把 Keil\C51\Lib\路径下相应的库文件加入工程中，若未添加此库文件，则会提示“UNRESOLVED EXTERNAL SYMBOL”警告。具体库文件和编译模式的选择见表 6.9。

表 6.9 库文件和编译模式的选择表

库文件	编译模式
C51S.LIB	没有浮点运算的 Small model
C51C.LIB	没有浮点运算的 Compact model
C51L.LIB	没有浮点运算的 Large model
C51FPS.LIB	带浮点运算的 Small model
C51FPC.LIB	带浮点运算的 Compact model
C51FPL.LIB	带浮点运算的 Large model

通过以上三步设置，即可编译生成目标代码。

例如：

```
#include <reg51.h>
void main(void)
{
    P2=1;
    #pragma asm
    MOV    R7,#10
DEL: MOV  R6,#20
    DJNZ  R6,$
    DJNZ  R7,DEL
    #pragma endasm
    P2=0;
}
```

注意事项：

① 在汇编语言中可以加标签以执行跳转指令，但标签不要与编译器产生的其他标签相同；

② 在遵循了 C51 参数的调用规则后，当要传递 char 参数时，编译器会将其编译成通过 R7 传递，此时若在汇编语言中直接调用 R7，会出现定义的变量（形参）未调用警告。

## 2. C51 调用汇编函数

采用 C51 调用汇编子程序时，被调用的汇编程序的名字、段名、参数读取方式和返回值的设置都要按照相应的规则进行，否则将无法完成调用。同时还要注意以下 3 个方面的设置：

- ① 要在 C 程序中用 **extern** 语句声明即将调用的汇编函数；
- ② 要在汇编函数中用 **PUBLIC** 语句将被调用的汇编函数声明为公共函数；
- ③ 在汇编程序前面要注意段属性的说明。

### 6.6.5 C51 库函数

C51 强大功能及其高效率的重要体现之一在于其丰富的可直接调用的库函数，多使用库函数能使程序代码简单、结构清晰、易于调试和维护。标准库函数按功能不同写在各种头文件中，常用的头文件见表 6.10。使用时只要在程序最前面用 **#include** 预处理语句予以说明相应的头文件即可。比如 **printf** 函数就是放在 **stdio.h** 的头文件中，如果在程序中要使用 **printf** 函数，则在程序开始时一定要添加 **#include <stdio.h>** 语句。

表 6.10 C51 常用头文件简介

头文件名	说 明
reg51.h	51 单片机的特殊寄存器
reg52.h	52 单片机的特殊寄存器
stdio.h	标准输入和输出程序
math.h	数学程序
absacc.h	允许直接访问 8051 不同存储区的宏定义
string.h	字符串操作程序、缓冲区操作程序

## 6.7 C51 中断编程实例

8051 单片机有外部中断 0 和 1、定时/计数器 0 和 1、串口发送/接收等 5 个中断源。为了了解每个中断源的状态并实现对其控制，C51 系统为中断系统共设置了若干个特殊功能寄存器，绝大部分寄存器都可以实现位控制。

中断函数编程的完整形式如下：

**void 函数名(参数)[编译模式][重入][interrupt n][using m]**

编译模式为 **SMALL**、**COMPACT** 或 **LARGE**，用来指定参数和变量的存储空间。

重入：用于定义可重入函数。

**interrupt n** 用于定义中断函数，其中 **interrupt** 是关键字，**n** 为中断号，取值范围为 0~31。

**using m** 用于确定中断服务函数所使用的寄存器组，其中 **using** 是关键字，**m** 的取值范围为 0~3，用以选择单片机使用的寄存器组，如果不用 **using** 指定，则默认使用寄存器 0 组。

中断函数是 C51 的应用特色，在实际应用中经常要用，在编写 C51 的中断函数时，需要注意的几个问题：

- ① 中断函数没有返回值，因此它必须是一个 **void** 类型的函数；
- ② 中断函数不允许利用形式参数进行数据传递，只能利用寄存器实现；
- ③ 不允许直接调用中断函数；
- ④ 中断函数对压栈和出栈的处理由编译器完成，无须人工管理；



- ⑤ 需要严格注意 `using m` 的使用，必须确保寄存器组的正确切换；
- ⑥ 进入中断函数时，SFR 中的 A，B，DPH，DPL 和 PSW 都需要入栈；
- ⑦ 函数退出前，所有的寄存器内容要出栈；
- ⑧ 函数由 8051 的特定中断返回指令“RETI”终止。

**【例 6.2】** 设单片机的晶振频率为 12MHz，要求在 P0.3 引脚上输出周期为 2ms 的方波。

**解** 周期为 2ms 的方波要求定时的间隔 1ms，定时时间到则 P0.3 取反。定时器计数频率=晶振频率/12=1MHz，计数周期=1/计数频率=1μs。1ms=1000μs，故计算器要计数 1000 次。考虑到计数器工作时是向上计数，所以必须给定时器赋初值为 65536-1000。用定时器 0 的方式 1 编程，采用中断方式。

```
#include <reg51.h>
sbit LED=P0^3;
void time0(void) interrupt 1 using 1 /*定义 T/C 中断函数*/
{
    LED=!LED; /* P0.3 取反 */
    TH0=((65536-1000)/256); /*装载计数初值*/
    TL0=((65536-1000)%256);
}
void main(void)
{
    TMOD=0x01; /*设置定时器 0 的工作方式为 1*/
    TH0=((65536-1000)/256); /*装载计数初值*/
    TL0=((65536-1000)%256);
    EA=1; /*开启总中断*/
    ET0=1; /*开启 T/C0 中断*/
    TR0=1; /*启动 T/C0 定时*/
    while(1); /*死循环等待中断*/
}
```

## 6.8 C51 实例仿真介绍

### 6.8.1 C51 仿真实例

下面以例 6.3 为载体讲述 Keil 仿真的具体过程。

**【例 6.3】** 设单片机的晶振频率为 12MHz，要求采用延时的方式在 P0.3 引脚上输出周期为 1s 的方波。

(1) 参照 1.5 节的步骤，建立 Keil 项目工程，生成可执行的二进制代码。

参考程序源代码：

```
#include <reg51.h>
sbit LED=P0^3;
void delay(t)
{
    int i,j;
    for(i=0;i<t;i++)
        for(j=0;j<100;j++);
}
```

```

void main(void)
{
    while (1)
    {
        delay(200);
        LED=!LED;
    }
}

```

(2) 利用 Proteus 8 Professional 建立硬件仿真电路，运行得到仿真结果，如图 6.9 所示。

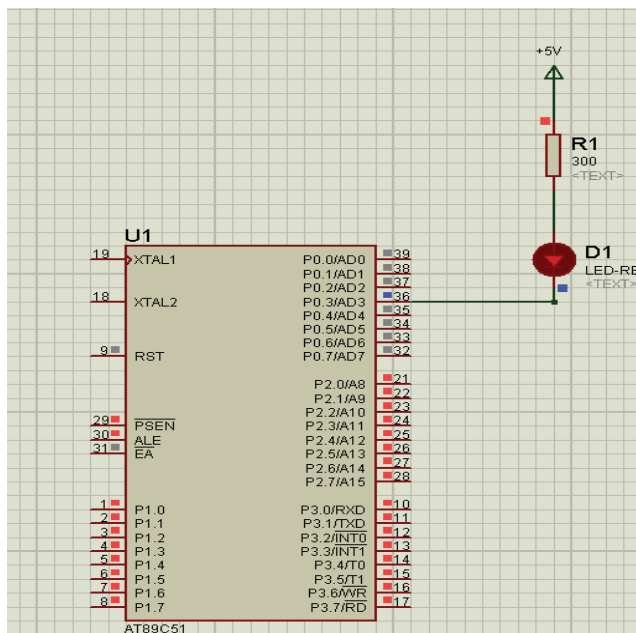


图 6.9 硬件电路仿真效果图

## 6.8.2 混合编程实例

本例程采用 C51 调用汇编子程序的形式，C 语言程序存放在 main.c 文件中，被调用的汇编函数代码存放在 delay.a51 文件中。被调用的汇编函数名称为 DELAY100，是一个带参数的延时程序，参数是 char 型，所以通过 R7 传递。

(1) 在 Keil μVision4 中建立一个项目工程，项目名称：sw。

(2) 建立带参数汇编程序 delay.a51。

```

/*****delay.a51*****/
?PR?DELAY100 SEGMENT CODE; //在程序存储区中定义段
PUBLIC _DELAY100;           //声明函数（带参数传递,故函数形式为_DELAY100）
RSEG ?PR?DELAY100;          //函数可被连接器放在任何地方
_DELAY100:  MOV  R3,#200
DE2:        MOV  R4,#126
DE3:        DJNZ R4,DE3
             DJNZ R3,DE2
             DJNZ R7,_DELAY100
             RET

```

END

(3) 建立 C 程序文件 main.c。

```
/******main.c*****/  
#include <reg51.h>  
extern void delay100();  
extern DELAY100(a); //声明外部函数,以便在 C51 中直接调用  
unsigned char a=20;  
sbit LED=P0^3;  
void main()  
{  
    while(1)  
    {  
        LED=~LED;  
        DELAY100(a);  
    }  
}
```

(4) 将 main.c、delay.a51 两个文件添加到同一个项目工程中编译,生成 sw.Hex 可执行代码。

(5) 利用 Proteus8.1 构建硬件电路,加载 sw.Hex 二进制代码,运行即可得到仿真效果图,如图 6.10 所示。

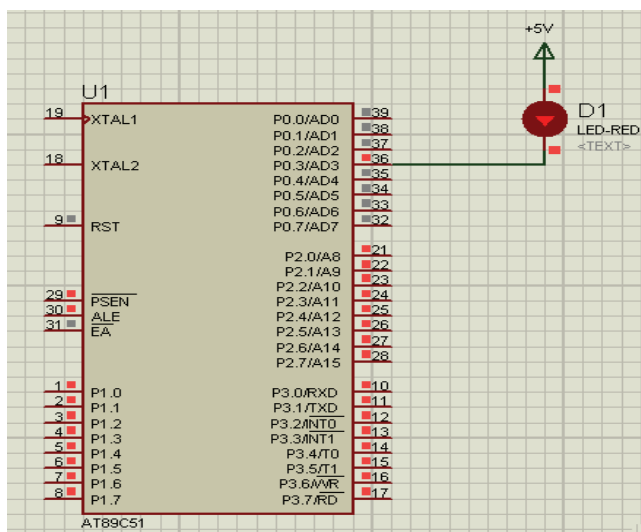


图 6.10 硬件电路仿真效果图

## 本章小结

本章主要介绍了 C51 语言的数据类型、运算符的优先级、控制流程、结构特点、函数调用和程序编写例程等,主要涉及以下内容:

(1) C51 数据类型包括字符型(char)、整型(int)、长整型(long)、浮点型(float)等几种类型。存储类型包括 data、bdata、idata、pdata、xdata 和 code 类型。

(2) C51 的运算符包括赋值运算符(=)、算术运算符(加、减、乘、除和求余)、关系运算符和逻辑运算符等形式。其中各运算符的优先级和结合原则是本章节的重点和难点。

(3) C51 程序通常有顺序结构、选择结构和循环结构等 3 种类型，其中控制语句主要体现在条件语句 (if)、循环语句 (for 和 while)、开关语句 (switch case) 和跳转语句 (break、continue 和 goto) 等几种基本类型。

(4) C51 的数据类型除 4 种基本数据类型外，还有数组、指针、结构、枚举等几种构造数据类型。

(5) C51 函数包括函数定义、函数调用和函数说明 3 个部分，同时在混合编程和函数调用时的参数传递是程序员升华的重点。

## 思考题及习题

6.1 C51 支持的数据结构和存储器类型有哪些？

6.2 设  $x=4$ ,  $y=8$ , 说明下列各题运算后  $x$ ,  $y$ ,  $z$  的值分别是多少？

(1)  $z=(++x)*(--y)$ ; (2)  $z=(++x)+(y--)$

(3)  $z=(x++)*(--y)$ ; (4)  $z=(x++)+(y--)$

6.3 C51 中断函数是如何定义的？各个选项有何意义？

6.4 C51 应用程序的参数传递有哪些方式？特点是什么？

6.5 一般指针与基于存储器的指针有何区别？

6.6 设  $a=3$ ,  $b=4$ ,  $c=5$ , 写出下列关系表达式或逻辑表达式的结果。

(1)  $a+b>c \ \&\& \ b==c$  (2)  $a||b+c\&\&b-c$

(3)  $!(a>b) \ \&\& \ !c|| \ 1$  (4)  $!(a+b)+c-1\&\&b+c/2$

6.7 用分支结构编程实现，输入“1”时显示“a”，输入“2”时显示“b”，输入“3”时显示“c”，输入“4”时显示“d”，输入“5”时结束。

6.8 输入 3 无符号数据，要求按由大到小的顺序输出。

6.9 用循环结构编写程序实现输出 1~10 的平方和。

6.10 设  $f_{osc}=12\text{MHz}$ , 8051 定时器 0 的方式 0、方式 1、方式 2 的最大定时间隔分别是多少？

6.11 用单片机内部定时器来产生矩形波，设单片机时钟频率为 12MHz。要求在 P1.0 引脚上输出频率为 1kHz，试写出有关的程序。

6.12 设  $f_{osc}=12\text{MHz}$ , 用延时程序要求在 P0 口上输出频率为 1Hz 的流水灯，试写出有关的程序，并给出 Proteus 硬件仿真结果。

## 第7章 80C51 的中断系统及定时/计数器

中断系统是计算机或者单片机的重要功能部件。有了中断系统，便可以使微处理器具备对外部的异步事件进行处理的能力。当微处理器的 CPU 正在执行程序的过程中，如果外部硬件或者内部组件有紧急的请求（如通信、断电、发生重大故障等），中断系统就可以将当前的程序暂停，优先处理这些中断请求。这种处理方式，对整个系统的稳定性、健壮性至关重要，同时也能大大提高处理器的效率，使得系统的应用更加灵活多变。

定时、计数是控制系统中两个重要功能，在实际的控制系统中，经常需要对某些信号进行定时扫描和定时监测，或者需要定时输出某些控制信号。80C51 中集成的定时/计数器就可以实现这两种功能，且实现的方式常常又是中断方式，因此我们把中断和定时/计数器放在一章来介绍。

### 7.1 中 断 概 述

#### 1. 中断的概念

中断是指单片机在执行程序的过程中，当出现异常情况或特殊请求时，单片机机停止当前程序的运行，转向对这些异常情况或特殊请求进行处理，当处理结束后再返回原程序的间断处，继续执行原程序，这一现象称为中断。

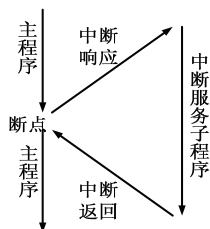


图 7.1 中断执行过程图

中断是单片机实时处理内部或外部事件的一种内部机制。

中断执行过程示意图可由图 7.1 表示。在图 7.1 中，原来正常执行的程序称为主程序；用来处理突发事件或故障的程序称为中断服务子程序；导致中断产生的原因称为中断源；主程序被中断源打断，转去执行中断服务子程序的位置称为断点。

中断是现实世界的一种反映，例如，某人正在看书，另外一个人叫他，此时他放下书，去和另外一个人谈话，等谈话完毕后再回来看书，这个过程就可以看成是一个中断处理过程：执行主程序（看书）——中断（呼叫，谈话）——中断返回（继续看书）。

#### 2. 中断的作用

中断不只是 51 系列单片机所特有的，目前基本上所有的微处理器均具备完善的中断系统。中断系统是一个非常实用的微处理器组件，合理地使用中断技术，可以极大地提高单片机的工作效率和实时性。其主要作用体现在下面两个方面。

##### （1）对外部信号的实时处理

在基于单片机的应用系统中，单片机作为整个系统的控制和处理中心，它和外围设备的信息交换非常频繁，这种信息交换一般采用两种方式，一种是查询方式，另外一种为中断方式。例如，当拨动一个开关，一盏 LED 灯熄灭，如果采用查询方式，单片机就必须时时刻刻查询开关的状态，而不能执行其他的程序，这将大大降低单片机的执行效率。如果采用中断方式，单片机就可以执行其他的任务，当开关状态改变，产生一个中断时，才转去中断服务子程序把 LED 灯熄灭。这种中断方式，可以满足大部分的实时控制场合。

## （2）故障处理

在单片机系统运行过程中，会有很多无法预测的故障或错误产生，例如掉电、计算溢出等。当产生掉电故障时，会立即执行相应的中断处理，保护重要的系统参数，以便后续的系统恢复。当发生错误时，也会有相应的中断处理子程序运行，自动修改算法参数并发出警告。这些都采用的是中断处理方式。

## 3. 中断源的分类

在实际系统中，中断源的种类繁多，不同微处理器也有不同的中断源，从中断执行的角度来看，可以分成两类。

### （1）处理器预先考虑的中断

这些中断的处理是处理器在设计之初就进行了考虑的。如：除数为零中断、溢出中断、掉电中断、集成的接口电路中断。这类中断是我们常见的一类中断，几乎所有的微处理器都预先定义了这类中断。此类中断发生后，硬件可以快速地找到相应的中断服务子程序去执行相应的处理。不同的处理器对这类中断的选择是不一样的。

### （2）处理器没有预先考虑而需要扩展的中断

这类中断通常与具体的实际应用有关，微处理器不可能在设计芯片时就将所有可能的中断都考虑进去，这涉及成本问题。同时，微处理器的中断资源也是有限的，当中断资源不够用，就需要扩展不同的中断。如：某系统同时需要外部定时器中断和键盘中断，这些中断由外围器件向处理器发出中断请求，这时就需要通过扩展电路来实现。

## 7.2 中断处理过程

### 1. 简单中断的处理过程

当中断产生时，处理器在执行完当前指令后，如果允许响应中断的条件满足，处理器就会转向中断服务子程序，中断系统会自动保存断点，当执行完中断服务子程序后，再返回断点处继续执行原程序。为了更好地了解中断执行过程，我们把中断的处理过程分成以下几个步骤。

#### （1）中断源识别和中断入口地址查找

当处理器收到中断请求，并允许响应时，首先要做的就是识别中断源，判断是哪个中断源发出的中断请求，然后根据中断源找到相应的中断入口地址。如何找到中断入口地址，不同的处理器有不同的处理方法，如在 80X86 系列处理器中，中断源的识别和中断入口地址查找是按中断源的类别分别处理的，过程较为复杂，但 51 单片机这个过程被大大简化了，51 系列基本型单片机只有 5 个中断源，这 5 个中断源的中断程序入口地址是固定的。

#### （2）断点保护

在处理器找到中断程序的入口地址后，就会暂停主程序的执行，转去执行中断服务子程序。为了在执行完中断服务子程序后，能够返回原程序断点处接着执行，就需要记忆断点的位置。断点就是中断返回后将要执行的指令的地址，保护断点就是保护断点地址，中断发生时，CPU 硬件自动把这个地址值压入堆栈，当执行完中断子程序后，通过 RETI 指令，再把这个地址值从堆栈中弹出送给 PC，从而实现中断返回。

#### （3）执行中断服务子程序

中断服务子程序是中断的主体。程序的具体内容由用户编程决定，不同的中断在不同的应用场合下，中断服务子程序的内容不同。

中断发生后，在主程序执行时，很多计算的中间结果都是使用内部寄存器来保存的，在主

程序和中断服务子程序中很可能会用到同一个寄存器，比如我们最常用到的累加器 ACC，在转去执行中断服务子程序时，ACC 中的值为 38H，而在中断服务子程序中，我们同样也使用到了累加器 ACC，如果在中断返回时，此时累加器 ACC 中的值为 56H，那么返回主程序后，就会导致主程序运行出错。因此在中断服务子程序的开始，需要把这些公用寄存器的内容进行保护，这就是保护现场。保护现场和保护断点十分类似，所不同的是，保护断点是硬件自动完成的，而保护现场则需要用户编写程序来实现。其中保护现场除了利用堆栈来进行保护外，还有一种比较有效的方法就是切换工作寄存器组，我们已经知道 80C51 有 4 组工作寄存器组，当中断发生后，在执行中断服务子程序之前，可以先切换到同主程序不同工作寄存器组，在执行完中断服务子程序后，再切换回主程序使用的工作寄存器组。

(4) 中断返回

执行完中断子程序后，返回断点处继续执行主程序。在 80C51 单片机中，就是执行 RETI 指令，这时，前面保护的断点就会从堆栈中弹出，送入程序计数器 PC 中，继续主程序的执行。

2. 复杂中断的执行

在实际的应用系统中，往往有多个中断源同时向处理器申请中断，也有可能中断产生时，处理器正在执行的就是某个其他中断服务子程序。那么在这些情况下 CPU 该如何处理呢？

(1) 中断优先级

当多个中断源同时提出中断申请时，处理器先处理哪个？为此提出了中断优先级的概念，给每个中断源赋予不同的优先级，在同一时刻，有多个中断请求时，中断系统按照中断源优先级的高低逐次响应，即优先级高的中断优先处理，处理完毕后，再处理优先级低的中断。

(2) 中断嵌套

如果处理器正在处理一个中断，这时又有一个中断产生了，那么，处理器是否响应新的中断？这时有两种处理方法。

一种方法是处理器不响应新的中断，这种中断管理机制比较简单。在中断在执行过程中，不响应其他任何新的中断请求。这种方法可以保证中断处理的及时性。但是这种机制有时会导致比较严重的后果，比如一些重要的中断（如断电）得不到及时处理，造成硬件损坏。

另一种处理方法是处理器响应新的中断，这时就会出现中断嵌套。如图 7.2 所示，主程序先被一个中断打断，转去执行中断服务子程序 1，在第一个中断子程序执行的过程中，又产生了一个新的中断，然后当前中断被新的中断给打断，转去执行中断服务子程序 2。执行完第二个中断服务子程序后，返回继续执行第一个中断子程序，第一个中断子程序执行完后，再返回主程序。

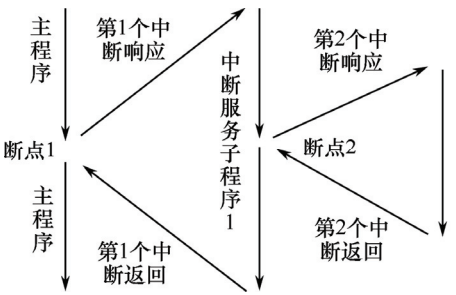


图 7.2 中断嵌套执行过程图

中断嵌套提高了处理器处理能力，理论上，中断嵌套的层数可以很多，但是嵌套层数太多，由于每次嵌套需要保护断点与现场，从而导致堆栈生长得太大，这对资源有限的单片机会造成较大的负担；另外，会导致最早响应的中断服务子程序可能要等待很久，才能执行完本身的中断任务，这明显降低了中断处理的及时性。

因此在微机系统中，允许嵌套层数最好要根据系统的实时性和资源来综合考虑，在 80C51 单片机中，允许的最大嵌套层数为 2。

## 7.3 80C51 的中断系统及其控制

### 1. 80C51 的中断系统结构及中断源

在基本型 80C51 系列单片机中,共有 5 个中断源,即:外部中断 0  $\overline{\text{INT0}}$  和外部中断 1  $\overline{\text{INT1}}$ , 定时/计数器 0 中断 T0 和定时/计数器 1 中断 T1, 串行通信接口中断 RX、TX。中断系统结构如图 7.3 所示。

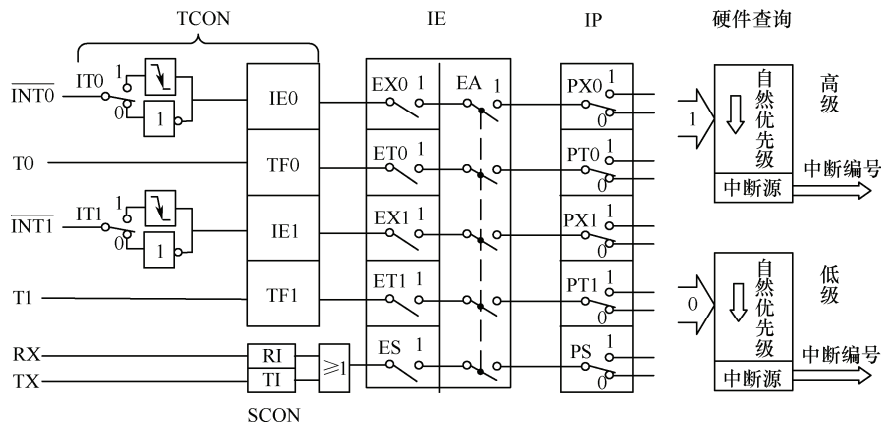


图 7.3 80C51 中断系统结构图

从结构图可以看出,80C51 的中断控制系统是由相应的寄存器所控制的,并不是一有中断,80C51 就会响应这个中断请求。

从左往右看,可以发现外部中断 0 和外部中断 1 比较特殊,控制位 IT0 和 IT1 控制外部中断的触发方式,当这两个控制位取 1 时,表示是下降沿触发方式,为 0 时,是低电平触发方式。每个中断源都有相应的中断请求标志位 (IE0、TF0、IE1、TF1、TI、RI) 与其对应,其中串行通信的发送和接收分别对应有两个中断请求标志位 (TI 和 RI),但是它们公用一个中断号,即处理器识别为一个中断源,具体区分二者需要用软件查询这两个中断标志位。再往右看,可以发现每个中断源都有相应的中断子开关 (EX0、ET0、EX1、ET1、ES),只有这个控制位为 1 时,对应的开关才闭合,除了子开关外,还有一个总开关 EA (全局中断使能控制位),当 EA=0,不管有中断,也不管前面的子开关是否闭合,都不可能产生中断,只有相应的子开关和全局开关都闭合时,才有可能产生中断。最右面的优先权选择开关 (PX0、PT0、PX1、PT1、PS) 用于确定每个中断源的优先级。从图 7.3 可以看出,我们操作 80C51 的中断系统,实际上也就是操作 80C51 内部的特殊功能寄存器。因此下面详细介绍 80C51 中断系统相关的特殊功能寄存器。

### 2. 中断请求标志

80C51 系列单片机共有 6 个中断申请标志位,分布在 TCON 和 SCON 寄存器中。其中外部中断和定时器溢出中断由 TCON 控制,串行口中断则由 SCON 来控制。单片机复位后所有中断请求标志位清 0,表示没有中断请求;为 1 时,表示有相应的中断请求,下面分别进行介绍。

#### (1) TCON 中的中断标志

TCON 的地址是 88H,可按位寻址,格式如下:

位地址	8FH	8EH	8DH	8CH	8BH	8AH	89H	88H
位名称	TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0

TF1: 定时/计数器 1(T1)中断请求标志位,当计数器计数溢出时,在中断被响应后,转向相应的中断服务程序,由硬件自动置 TF1=0,在查询方式下由软件清除。



TF0: 定时/计数器 1(T0)中断请求标志位, 操作与 TF1 相同。

IE1: 外部中断 1 中断请求标志位。在外部中断设为下降沿触发时,  $\overline{\text{INT1}}$  引脚的下降沿置该位为 1, 中断被响应后, 该位由硬件自动清 0; 在外部中断设为低电平触发时, 当  $\overline{\text{INT1}}$  为低电平 (0) 时, IE1 置 1, 此时, 撤销中断的办法只有把外部输入的低电平变为高电平。

IT1: 外部中断 1 触发方式选择位。当 IT1=1,  $\overline{\text{INT1}}$  引脚为下降沿触发方式; IT1=0,  $\overline{\text{INT1}}$  引脚为低电平触发方式。

IE0: 外部中断 0 中断请求标志位。操作与 IE1 相同。

IT0: 外部中断 0 触发方式选择位。功能与 IT1 相同。

定时/计数器中断: 当定时/计数器计数溢出时, 在最近机器周期的 S5P2 期间设置 TCON 寄存器中的中断标志位 TF0 或 TF1 为 1。中断请求标志位置 1 后, 会一直保持到中断被响应, 然后由单片机的内部硬件自动对它清 0; 在查询方式下, 则只能用软件清 0。

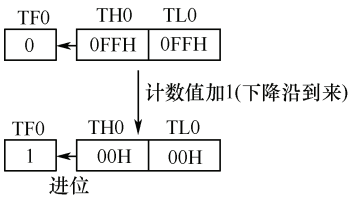


图 7.4 计数器溢出示意图

例如, 设定时/计数器 0 工作在 16 位计数器模式, 当计数到 FFFFH 后, 下一个计数 (下降沿) 一旦到来, 计数器就会设置中断标志位 TF0=1 (TF0=1 时, 在允许响应中断的情况下就可以向 CPU 申请中断了), 同时计数结果变为 0000H, 如图 7.4 所示。

外部中断: 80C51 单片机提供两个外部中断口, 分别从  $\overline{\text{INT0}}$  (P3.2) 和  $\overline{\text{INT1}}$  (P3.3) 引脚输入。这两个引脚是功能复用引脚, 既可以作为普通 I/O 口, 也可作为外部中断输入引脚。当用作外部中断输入时, 其中断触发方式是可选的。下面以外部中断 0 来讲述。

80C51 单片机在每个机器周期的 S5P2 期间扫描外部中断输入引脚的电平状态。当外部中断设置为下降沿触发时, 若处理器在连续两个机器周期扫描到  $\overline{\text{INT0}}$  引脚的电平先后为高电平和低电平时, 就会设置中断标志位 IE0 为 1, 表示外部有中断申请, 该中断申请信号会一直保持, 直到该中断被响应, 该标志由内部硬件自动清除。

当外部中断设置为电平触发方式时, 在外部中断引脚  $\overline{\text{INT0}}$  变为低电平时, IE0 变为 1, 并一直保持为 1, 直到引脚  $\overline{\text{INT0}}$  的输入变为高电平时, IE0 位才清 0。因此, 选择低电平触发方式时, 对  $\overline{\text{INT0}}$  的电平持续时间有严格要求, 必须保持  $\overline{\text{INT0}}$  引脚为低电平, 直到中断被响应才能变高, 而且在中断返回前必须变成高电平, 以撤销中断请求。若低电平时间太短, 则可能导致中断不会被响应; 若太长, 在中断子程序执行完后仍为低电平, 则 IE0 会一直保持为 1, 这时会导致一次中断请求, 得到多次响应。

外部中断 1 与外部中断 0 操作相同。

## (2) SCON 中的中断标志

SCON 的地址是 98H, 可按位寻址, 具体格式如下:

位地址	9FH	9EH	9DH	9CH	9BH	9AH	99H	98H
位名称	—	—	—	—	—	—	TI	RI

TI: 串口发送数据中断请求标志位。

RI: 串口接收数据中断请求标志位。

图 7.3 中, TI 和 RI 两个中断申请标志位通过或门后输出, 只要有一个为 1, 就可以向 CPU 申请中断, 其中断入口地址是相同的, 被认为是一个中断源。因此当发生串口中断时, 我们并不能马上判断是发送引起的中断, 还是接收引起的中断, 这时必须通过软件查询两个标志位哪

个为 1，来确定是发送还是接收中断，然后软件清除相应的中断请求标志位。

由此可知，在每个机器周期的 S5P2 期间，中断请求标志位会因为中断源申请中断而设置成 1，如果有 1 位或多位为 1，则表示在同一时间，有多个中断源向处理器申请中断。当中断标志位为 1 时，处理器是否响应这个中断请求，还需要后面的控制电路来决定。

3. 中断允许控制

从图 7.3 可以看出，每个中断源都有一个独立的中断控制开关，之后还有一个全局的中断控制开关。这些开关分别由各个中断源的中断使能控制位和全局中断使能控制位来控制。只有这些中断使能控制位为 1 时，相应的子开关和总开关才会闭合，相应的中断请求才能传送到处理器。这些中断使能控制位分布在特殊功能寄存器 IE 中。

IE 的地址为 A8H，可按位寻址，具体格式如下：

位地址	AFH	AEH	ADH	ACH	ABH	AAH	A9H	A8H
位名称	EA	—	—	ES	ET1	EX1	ET0	EX0

EA：全局中断使能控制位。当 EA=1，单片机允许各个中断，此时还需要由其他中断使能位来确定各个中断的允许或禁止；当 EA=0，单片机禁止所有中断，不响应任何中断请求。

ES：串口中断使能控制位。ES=1，允许响应串口发送中断和接收中断；ES=0，禁止响应串口发送中断和接收中断。

ET1：定时/计数器 1 中断使能控制位。ET1=1，允许响应定时/计数器 1 中断；ET1=0，禁止响应定时/计数器 1 中断。

EX1：外部中断 1 使能控制位。EX1=1，允许响应外部中断 1；EX1=0，禁止响应外部中断 1。

ET0：定时/计数器 0 中断使能控制位。功能与 EX0 相同。

EX0：外部中断 0 使能控制位。功能与 EX1 相同。

4. 中断优先权管理和中断嵌套原则

某个机器周期的 S5P2 期间，若有中断请求标志位有效时，处理器会在下一个机器周期的 S6 期间就会根据设置的中断优先等级响应中断，并在再下一个机器周期的 S1 期间开始执行中断服务子程序。80C51 单片机支持两级中断优先级，允许用户设置每个中断源为高级或低级中断。由中断优先级标志位来设置。对应位为 1 则设置为高优先级中断；为 0 则设置为低优先级中断。这些设置位分布在特殊功能寄存器 IP 中。

其中断裁决的原则是：高级中断和低级中断同时申请中断时，优先响应高级中断；当同级有多个中断同时发生时，则有中断优先权排队问题，这时按由中断系统硬件确定的自然优先级顺序来处理，参见表 7.1。

80C51 单片机的中断嵌套原则是：高级中断可以打断低级中断，低级中断不能打断高级中断，同级中断不能打断同级中断。

IP 的地址是 B8H，可按位寻址，具体格式如下：

位地址	BFH	BEH	BDH	BCH	BBH	BAH	B9H	B8H
位名称	—	—	—	PS	PT1	PX1	PT0	PX0

表 7.1 80C51 中断自然优先级和入口地址表

中断源	中断服务程序入口地址	中断标志	自然优先级顺序
外部中断 0	0003H	IE0	高
定时/计数器 0	000BH	TF0	↓
外部中断 1	0013H	IE1	↓
定时/计数器 1	001BH	TF1	↓
串行通信口	0023H	RI 或 TI	低

**PS:** 串口中断优先级设置位。当 PS=1 时, 串口中断设为高级中断; PS=0, 串口中断设为低级中断。

**PT1:** 定时/计数器 1 中断优先级设置位。PT1=1, 定时/计数器 1 中断设为高级中断; PT1=0, 定时/计数器 1 中断设为低级中断。

**PX1:** 外部中断 1 优先级设置位。PX1=1, 外部中断 1 设为高级中断; PX1=0, 外部中断 1 设为低级中断。

**PT0:** 定时/计数器 0 中断优先级设置位。PT0=1, 定时/计数器 0 中断设为高级中断; PT0=0, 定时/计数器 0 中断设为低级中断。

**PX0:** 外部中断 0 优先级设置位。PX0=1, 外部中断 0 设为高级中断; PX0=0, 外部中断 0 设为低级中断。

## 5. 中断响应的条件

当中断源发出中断请求信号时, 单片机并不总能对该中断进行响应, 一般来说, 单片机能响应中断应注意以下几个方面。

① 首先, 全局中断使能控制位 EA=1。

② 某个中断源对应的中断使能控制位有效, 即设置相应的中断允许子开关 (PX0, PX1, PT0, PT1, PS) 为 1。

③ 如果程序正在执行读/写寄存器 IE 和 IP 指令, 则执行完该指令后, 需要再执行一条其他指令才可以响应中断。

④ 如果程序正在执行返回指令, 则执行完该指令后, 需要再执行一条其他指令才可以响应中断, 这个特性常用来实现硬件单步执行。

⑤ 任何正在执行的指令在未完成前, 中断请求都不会响应。

⑥ 考虑中断优先级或者中断嵌套时带来的延时。

## 6. 中断服务程序的执行

当前面所有的中断响应条件都满足时, 处理器在当前指令执行完后的下一个机器周期内, 由硬件自动执行一条 LCALL 指令, 跳转到相应的中断服务子程序入口地址去执行中断服务子程序。在 80C51 单片机中, 中断程序的入口地址是固定的, 具体见表 7.1。

从表 7.1 中可以发现, 两个相邻的中断入口地址很接近, 只有 8 字节, 根本放置不了几个代码。在实际应用中, 一般都将一个跳转指令(LJMP, AJMP)放置入口地址处, 从而跳转到其他程序空间去执行较长的中断服务子程序。

例如, 外部中断 0:

```
ORG 0003H
LJMP INT_EX0
```

## 7. 中断服务子程序的编写

当 80C51 单片机响应中断请求, 跳转到相应的中断处理子程序时, 除了断点保护由硬件自动完成外, 保护现场、恢复现场、中断返回都需要用户自己编写, 中断处理服务子程序的具体内容要根据具体的应用目的来决定。除了以上这些外, 还要考虑是否允许中断嵌套, 在中断服务子程序中设置 EA=1, 则打开中断, 允许中断嵌套, 设置 EA=0, 则关闭中断, 不允许中断嵌套。还需要注意的是, 在保护现场和恢复现场指令的执行过程中, 如果出现中断则会导致程序混乱, 因此保护现场和恢复现场过程中需要关闭全局中断。

在编写中断服务子程序的代码时, 要尽量减少任务量, 让中断服务子程序能够快速执行完毕, 保证实时性。例如, 定时/计数器中断时, 为了保证定时时间的精确性, 我们往往只在定时

/计数器中断服务子程序中编写重载初值的代码，而其他一些相关操作都放在主程序执行，这样能最大限度地保证定时时间的精确度。

中断服务子程序的一般结构举例如下：

```
ORG 0000H
AJMP MAIN           ;跳转主程序
ORG 0003H           ;外部中断 0 入口地址 0003H
AJMP INT_EX0        ;不同的中断源使用不一样的语句标号
...
ORG 0030H           ;地址由用户自己设定
INT_EX0:            ;此例中外中断 0 子程序从地址 0030H 开始
CLR EA              ;保护现场之前,关中断,防止保护现场时,又有中断产生
PUSH PSW             ;保护状态寄存器 PSW,压入堆栈
PUSH ACC             ;保护累加器,压入堆栈
PUSH ...             ;保护中断服务子程序中其他使用到的寄存器
SETB EA              ;保护现场完成后,开中断
...                  ;此处也可不写,表示不允许中断嵌套
...                  ;中断服务子程序的主体,由用户编写
CLR EA              ;恢复现场之前,关中断
...                  ;若前面没有开中断,则此句可不写
POP ...              ;恢复现场
POP ACC              ;恢复 ACC 中的值,弹出堆栈
POP PSW              ;恢复 PSW 中的值,弹出堆栈
SETB EA              ;中断完成后,开中断
RETI                 ;中断返回,断点接续,中断服务子程序结束
MAIN:                ;主程序
...
```

8. 中断撤销

中断请求撤销的主要目的是：保证对于一次中断请求信号只执行一次中断响应。CPU 响应中断后，需要及时将中断请求标志清除，否则将引起一个中断信号触发多次中断响应。中断撤销一般分为硬件自动处理和软件清除。

硬件自动处理：对于外部中断 0、外部中断 1、定时/计数器 T0 和 T1 来说，在 CPU 响应中断后，将自动清除该中断请求的标志位，无须软件处理。

软件清除中断：对于串行接口的中断请求，当 CPU 响应中断后，硬件不会自动清除中断标志位 TI 或 RI，因此需要在中断服务程序中用软件来人工清除。

需要注意的是，对于外部中断，一般推荐采用下降沿触发方式，而不采用低电平触发方式。因为低电平触发时，触发电平有可能在很长一段时间内都会保持，这样很容易引发再次触发。

而当外部中断必须使用低电平触发时，中断请求标志位只与外部输入信号有关，当中断请求标志位置 1 后，既不能由硬件自动清除，也不能由软件清除。这时要撤销中断，必须把引起中断请求的低电平拉高变成高电平。一种比较简单做法是在外部中断输入引脚和外部中断源之间接一个具有异步置 1

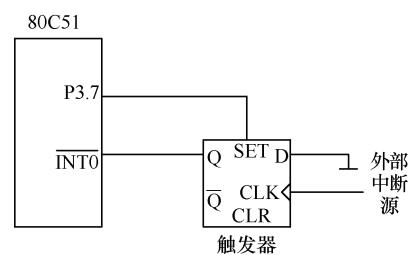


图 7.5 外部中断申请的撤销电路

功能的 D 触发器,具体连接电路如图 7.5 所示。该触发器的输入引脚 D 接地,输出引脚 Q 接  $\overline{\text{INT0}}$  (P3.3),异步置位引脚 (SET) 接到 P3.7,外部中断源的中断输入接到时钟 CLK 引脚上。我们知道,当外部中断源的输入引脚有一个上升沿时,触发器会采集输入引脚 D 上的电平,此时,由于 D 引脚接地,恒为 0,所以触发器的输出引脚 Q 输出低电平,此时,外部中断 0 产生中断,当处理完这个中断后,使 P3.7 输出一个高电平到触发器的置位端 SET,置位触发器,使得 Q 变为 1,也就是撤销中断。当中断撤销后,为了保证能继续响应新的中断请求,再使 P3.7 输出 0。

在外部中断 0 服务子程序的结尾部分加入如下代码即可:

```
SETB P3.7      ;异步置 Q 脚为高电平,清除中断申请
CLR P3.7        ;撤除异步置位信号,保证能响应新的中断
```

9. 中断响应时间

从中断源发出中断请求到处理器执行该中断服务子程序的这一段时间称为中断响应时间。

在一些特殊的应用中,我们需要对中断的响应时间作出尽量精确的估计,以实现对整个系统的运行有精确的时间估计,这在一些严格要求系统运行时间的应用中十分必要。下面我们根据在处理中断过程中可能遇到的各种情况来讨论中断响应时间。

中断源发出中断请求后,在每个机器周期的 S5P2 期间相应的中断请求标志位置 1,在下一个机器周期的 S6 期间,处理器会先判断所有中断请求中哪个中断的优先级高,然后优先级最高的中断才向处理器申请中断。因此,从中断源申请中断到处理器接收到中断,共需要 1 个机器周期的时间。当接收到中断请求后,在下一个机器周期处理器是否跳转到中断服务子程序入口地址,还受到以下影响。

① 当前机器周期内,处理器是不是正在执行指令的最后一个机器周期,如果不是,则还需要等到当前指令执行完成。例如,正在执行除法指令的第一个机器周期,则需要等待的机器周期数是 3 个机器周期 (乘法指令是 4 周期指令)。

② 若当前正在执行 RETI 指令或其他读/写与中断有关的寄存器 IE、IP 的指令,则需要执行完该指令后,再执行一条指令,然后再转入中断服务子程序。

当上述情况没有遇到或者已经完成等待后,会由硬件自动执行一个长跳转 LCALL 指令 (2 周期指令),跳转到相应的中断服务子程序入口地址,开始执行由用户编写的中断服务程序。

综合上面的讨论,我们可以估计出,从中断申请到执行第一条中断服务程序的最短时间是 3 个时间周期 (优先权扫描 1 个周期, LCALL 指令 2 个周期)。最长的响应时间为 8 个机器周期,除了必需的 3 个机器周期外,考虑最坏的情况,比如执行 RETI 的第一个机器周期,那么还必须 1 个机器周期去等待 RETI 指令完成,同时,执行完 RETI 指令后还必须再执行一个指令,这个指令最长是一个 4 机器周期指令,那么总共还需要额外等待 5 个机器周期,加上必需的 3 个机器周期,可以估算出最长的等待时间为 8 个机器周期。所以中断响应时间为 3~8 个机器周期,可以参看图 7.6。当然还有一种情况是,目前正在执行同级或者更高级别的中断服务子程序,则需要等到中断执行完毕,等待的时间将更长。

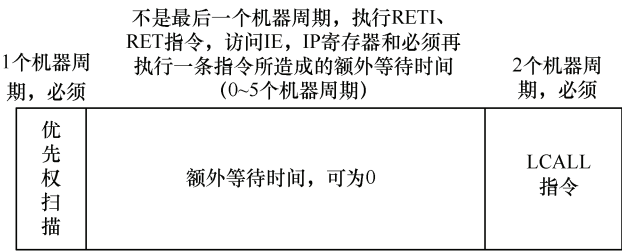


图 7.6 中断响应时间分析

## 10. 中断系统的初始化

在具体的应用中，需要对可能用到的中断作出一些初始设置，具体来说就是在主程序中对中断系统进行初始化。初始化的内容包括打开全局中断使能位、打开使用到的中断源的中断使能位、根据具体需求设置各中断源的优先权等级等。初始化在不同的应用中有不同的设置，一般性的原则就是用到哪个中断，就设置哪个中断相关的控制寄存器。没有用到的不去设置，防止意外产生。

例如，某个单片机系统中，需要使用到外部中断 1，下降沿触发方式，定时器 0 中断，串口中断，其他中断关闭不用，串口中断具有最高优先级。则其初始化代码如下：

```
SETB  IT1      ;设置外部中断 1 下降沿触发
SETB  EX1      ;开外部中断 1 使能子开关
SETB  ET0      ;开定时/计数器 0 使能子开关
SETB  ES       ;开串口中断使能子开关
SETB  PS       ;设置串口中断为高优先级,其余中断重启时默认为低优先级,可以不设置
SETB  EA       ;开全局中断
```

## 7.4 80C51 中断源的扩展

80C51 单片机只有两个外部中断源。在很多测控系统中，外部有很多的中断源需要处理，只有两个外部中断源明显是不够用的。这时往往需要进行外部中断源的扩展，从而实现对多个外部中断源的响应处理能力。扩展外部中断源时有两个方法：使用定时/计数器来扩展和使用查询方式来扩展。其中，定时/计数器扩展的方法在介绍定时/计数器时详细介绍，下面介绍查询方式扩展外部中断源。

图 7.7 所示为利用与门进行 4 个外部中断源扩展的原理图。4 个外部中断通过一个与门连接到 80C51 的  $\overline{\text{INT1}}$  引脚，同时每个扩展的外部中断源又连接到 P1.0~P1.3，这是为后续的查询操作做准备。设置外部中断 1 为下降沿触发方式。在初始情况时，扩展的 4 个外部中断源 INT10~INT13 都为高电平，表明外部没有中断，此时与门输出高电平，80C51 没有中断请求。当外部中断源中某一个或几个有中断请求时，相应的引脚

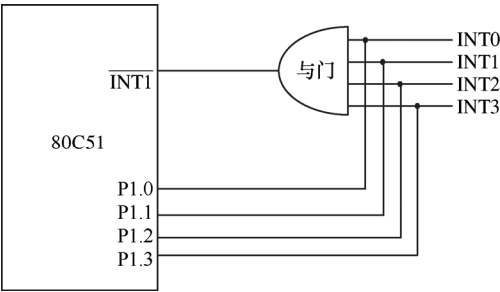


图 7.7 中断扩展原理图

(INT10~INT13) 变为低电平，此时与门输出低电平，产生下降沿，80C51 响应中断请求。但此时，并不知道究竟是哪个扩展的外部中断源产生中断，这时在中断服务子程序通过查询 P1.0~P1.3 引脚的电平来确定中断源。

参考代码如下：

```
ORG 0000H
AJMP START
ORG 0013H      ;外部中断 1 入口地址
AJMP INT_EX1   ;不同的中断源使用不一样的语句标号
ORG 0030H      ;外部中断 1 服务子程序开始地址
INT_EX1:
CLR EA         ;保护现场之前,关中断
PUSH ACC       ;保护累加器
```

```

PUSH PSW ;保护状态寄存器 PSW
PUSH ... ;保护中断服务子程序中其他使用到的寄存器
JNB P1.0,INT_EEX10 ;查询扩展外部中断 INT10
JNB P1.1,INT_EEX11 ;查询扩展外部中断 INT11
JNB P1.2,INT_EEX12 ;查询扩展外部中断 INT12
JNB P1.3,INT_EEX13 ;查询扩展外部中断 INT13
END_INT_EX0:
POP ... ;恢复现场,注意弹出堆栈和压入堆栈的对应关系
POP PSW
POP ACC
SETB EA ;中断完成后,开中断
RETI ;中断返回,断点接续,中断服务子程序结束
INT_EEX10:
... ;扩充外部中断 0 处理,根据实际情况编写
AJMP END_INT_EX0
INT_EEX11:
... ;扩充外部中断 1 处理,根据实际情况编写
AJMP END_INT_EX0
INT_EEX12:
... ;扩充外部中断 2 处理,根据实际情况编写
AJMP END_INT_EX0
INT_EEX13:
... ;扩充外部中断 3 处理,根据实际情况编写
AJMP END_INT_EX0
ORG 0100H
START:
SETB EX1 ;打开外部中断 0
SETB EA ;开全局中断
...

```

从上述程序中可以看出,扩展的外部中断 INT10 具有最高的优先级,INT13 的优先级最低。需注意的是,在扩充的外部中断处理程序注意中断撤销的处理。

## 7.5 80C51 的定时/计数器及其应用

在单片机的实际应用系统中,经常会使用到精确延时、定时扫描、统计事件的发生次数和产生一定频率的声音等功能。这些功能都需要在时序电路中实现定时和计数的功能,定时和计数是控制系统中的两个重要功能。一般来说,有 3 种方法来实现定时和计数功能。

① 硬件定时:使用时基电路(如 555 定时芯片)来组成硬件定时电路。这种方法需要额外的元器件,使得系统复杂,成本高,且其定时值不能由软件控制并修改,即此方法不可编程,调试困难。

② 软件定时:这种方式通常是通过循环执行一段程序来实现的,因为每个指令的执行都需要消耗机器周期。该方法的优点是修改定时时间非常方便,灵活性和通用性好,但缺点也同样明显,这种定时方式是以占用 CPU 时间为代价的,大大降低了 CPU 的利用率,且定时的精度不高,一般应用在定时时间较短和精度要求不高的场合。



③ 可编程定时/计数器：这种定时器的定时值和定时范围可以用软件来确定修改，使用灵活，功能强。且不占用处理器时间，有自己独立的时钟驱动。例如，可编程芯片 8253、8254、MC6840 等。

目前许多微处理器本身都带有定时/计数器，使用时不需要扩展额外的定时/计数器芯片。

80C51 系列单片机内部集成了两个可编程的 16 位定时/计数器，即定时/计数器 0 和 1，简称 T0 和 T1。每个定时/计数器都可独立工作，可以设置成定时和计数两种模式，有 4 种工作方式可供选择。

### 1. 定时/计数器的结构

80C51 内部定时/计数器结构如图 7.8 所示。

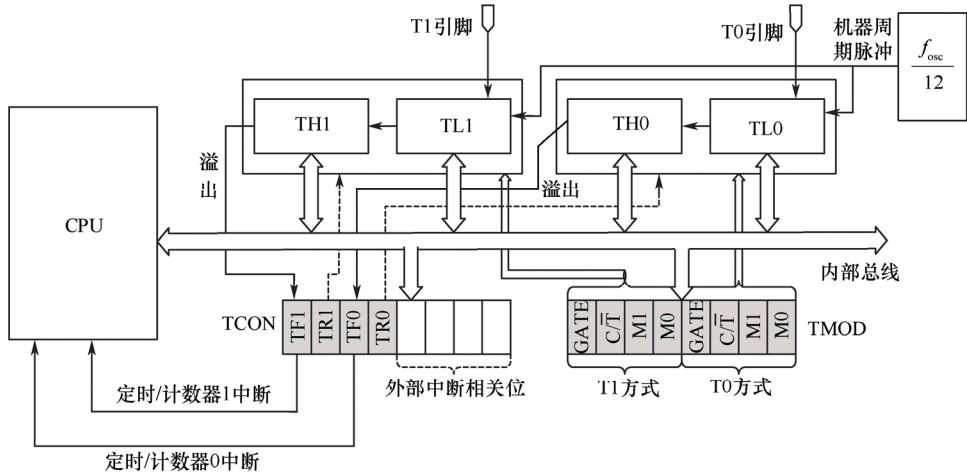


图 7.8 80C51 内部定时/计数器结构图

80C51 单片机内部集成的定时/计数器的核心由两个 16 位加 1 计数寄存器 T0 和 T1 组成，每个计数寄存器都分成高 8 位（THx）和低 8 位（TLx）分别访问（x=1 或 0）。T0（16 位）由 TH0（8 位）和 TL0（8 位）组成，字节地址分别是 8CH 和 8AH；T1（16 位）由 TH1（8 位）和 TL1（8 位）组成，字节地址分别是 8DH 和 8BH。每个定时/计数器的时钟源可以选择内部时钟源和外部时钟源，当选择内部时钟源时，时钟脉冲序列由单片机内部产生，对应图 7.8 中的  $f_{osc}/12$  方框；当选择外部时钟源时，由引脚 T0（P3.4）和 T1（P3.5）输入外部时钟脉冲序列。每个定时/计数器有 4 种工作方式可选。

### 2. 定时/计数器的功能

80C51 的定时/计数器有两个可选择的时钟源：一个为内部时钟源，由单片机内部提供时钟信号，此时频率固定，常用作定时器；另一个为外部时钟源，此时外部时钟信号通过相应的引脚输入定时/计数器模块，此时既可做定时器也可做计数器，常用作计数器，用来统计外部事件发生的次数。

#### （1）计数功能

当选择外部时钟源时，外部时钟信号分别由引脚 P3.4（T0）输入定时/计数器 0，引脚 P3.5（T1）输入定时/计数器 1。此时时钟信号的下降沿有效，单片机在每个机器周期的 S5P2 期间会采样外部输入时钟信号的电平状态，当连续两次采样得到的信号先后为“1”和“0”时，单片机认为外部输入了一个下降沿，此时在下一个机器周期的 S3P1 期间计数器的计数值加 1。由于采样一个下降沿需要两个机器周期，即需要 24 个振荡周期，因此外部输入的计数脉冲的最高频率为单片机振荡频率的 1/24，即  $f_{osc}/24$ 。为了确保给定的电平在变化前至少被采样一次，对外部输入信号电平要求至少保持一个机器周期。



作为计数器使用时，常用来统计外部事件的发生次数。既可以把计数初值设置为零，然后计数外部事件的发生次数，计数结束后，读取计数结果供后续处理。也可以把计数初值设置成和计数满值相差一定数值的数，例如，16 位定时/计数器的计数溢出值为 65536，可以把计数初值设置为 65534，那么当外部事件发生 2 次（外部时钟信号输入 2 个下降沿）时，计数器溢出，产生中断去进行相关处理。

(2) 定时功能

当定时/计数器选择内部时钟源时，时钟信号由单片机内部产生，频率是单片机主时钟的 12 分频，即  $f_{osc}/12$ ，选择内部时钟源时，由于频率固定，常用作定时器。如果 80C51 单片机选择 6MHz 时钟，则计数时钟周期为

$$T = 12 \times \frac{1}{6 \times 10^6} = 2 \mu s$$

当作为定时器使用时，根据定时时间的长度和单片机的主时钟频率，要计算出定时/计数器的初值，然后启动定时/计数器开始定时。当定时时间到，产生中断或者软件查询等待定时结束。相对于软件定时来说，这种定时方式的稳定性和准确度高得多。需要注意的是，定时/计数器的计数和定时功能在本质上都是通过计数时钟信号的下降沿个数来实现的，两者之间没有根本上的区别。在实际应用中，有各种长度的定时时间要求，仅依靠 80C51 单片机内部的两个定时/计数器来定时是满足不了要求的，这时可以通过软件定时和硬件定时相结合的方法来满足各种定时长度的需求，具体见习题 7.20。

3. 定时/计数器的方式寄存器和控制寄存器

(1) 工作方式寄存器 TMOD

TMOD 用来设置定时/计数器的启动方式，选择定时/计数器的时钟源，设置定时/计数器的工作方式，其地址是 89H，不能按位寻址，只能对整个寄存器编程，复位后 TMOD 的所有位均清 0。TMOD 寄存器分为两个部分，其中高 4 位用于控制定时/计数器 1，低 4 位用于控制定时/计数器 0。具体格式如下：

名称	定时/计数器 1				定时/计数器 0			
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
	GATE	C/ $\overline{T}$	M1	M0	GATE	C/ $\overline{T}$	M1	M0

GATE: 计数器门控制位，用来决定定时/计数器的启动是否受外部中断输入引脚  $\overline{INTx}$  (x=1 或 0) 的输入电平控制。当 GATE=0 时，则引脚  $\overline{INTx}$  (x=1 或 0) 电平对定时/计数器不产生影响，只要启动控制位 TRx=1 (x=1 或 0)，定时/计数器就开始工作；当 GATE=1，则需外部中断引脚  $\overline{INTx}$  (x=1 或 0) 为 1，且启动控制位 TRx=1 (x=1 或 0)，计数器才开始工作，这种设置

常用来测量  $\overline{INTx}$  引脚输入高电平的脉冲宽度。

GATE 和  $\overline{INTx}$  (x=1 或 0) 逻辑关系图可参考图 7.9 中的逻辑关系图。

C/ $\overline{T}$ : 时钟选择控制位。当 C/ $\overline{T}$ =0，为定时功能，采用晶振频率的 12 分频作为定时/计数器的时钟信号源。当 C/ $\overline{T}$ =1，为计数功能，采用外部引脚 P3.4 或 P3.5 的输入脉冲作为时钟信号源。

M1M0: 工作方式选择位，两位形成 4 种编码，对应 4 种工作方式，具体见表 7.2。

表 7.2 定时/计数器方式选择表

M1M0	工作方式	
00	方式 0，13 位定时/计数器	
01	方式 1，16 位定时/计数器	
10	方式 2，自动重装的 8 位定时/计数器	
11	方式 3	定时/计数器 0，分成两个 8 位计数器
		定时/计数器 1，停止计数

(2) 控制寄存器 TCON

TCON 为定时/计数器的控制寄存器，高 4 位用作控制定时/计数器的启动、停止和中断请求标志位；低 4 位用作外部中断的中断请求标志位和触发方式控制位。该寄存器地址是 88H，可按位寻址。具体格式如下：

位地址	8FH	8EH	8DH	8CH	8BH	8AH	89H	88H
位名称	TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0

TF1：定时/计数器 1 中断请求标志位，当定时/计数器的计数值溢出时，由硬件将 TF1 置 1，并申请中断，在中断被响应后，硬件又自动将 TF1 清 0。在查询方式下由软件清 0。

TR1：定时/计数器 1 的启动控制位，由软件置位和清 0。当 GATE=0 时，TR1=1 时定时/计数器 1 开始计数，TR1=0，定时/计数器 1 停止计数，保持原值；当 GATE=1 时，TR1=1 且  $\overline{INT1}=1$  时，定时/计数器 1 开始计数，TR1=0 或  $\overline{INT1}=0$ ，定时/计数器 1 停止计数，保持原值。

TF0：定时/计数器 0 中断请求标志位，功能与 TF1 相同。

TR0：定时/计数器 0 的启动控制位，功能与 TR1 相同。

4. 定时/计数器的 4 种工作方式

(1) 方式 1：16 位定时/计数器

定时/计数器 0 和定时/计数器 1 的方式 1 的结构和原理是完全相同的，下面以定时/计数器 0 为例展开讨论。

当 M1M0=01 时，定时/计数器 0 工作于方式 1，其结构如图 7.9 所示。C/ $\overline{T}$  控制位用来选择定时/计数器时钟信号的来源，当 C/ $\overline{T}$ =1 时，选择外部时钟源；当 C/ $\overline{T}$ =0 时，选择单片机内部时钟源，频率为晶振频率的 12 分频。当 GATE=0 时，我们观察结构图，可以发现或门输出恒为高电平，与  $\overline{INT0}$  无关，这时只要 TR0=1 时，与门输出高电平，时钟控制开关闭合，计数器开始工作；而当 GATE=1 时，或门要输出高电平， $\overline{INT0}$  必须为 1，此时与门输出受 TR0 和  $\overline{INT0}$  共同影响，只有二者都为高电平时，时钟控制开关才闭合，计数器开始工作。

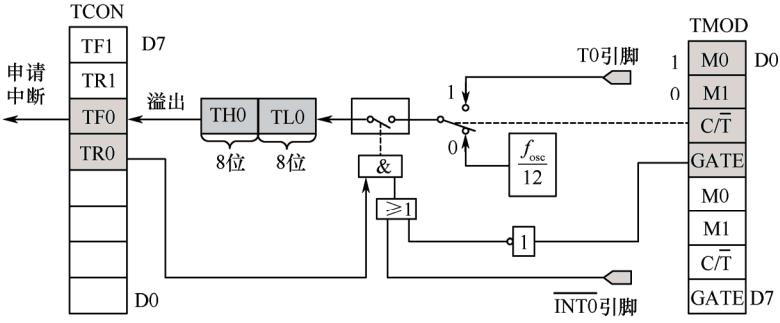


图 7.9 T0 方式 1 结构图

计数寄存器 TH0 (高 8 位) 和 TL0 (低 8 位) 是可分别读/写的，都为 8 位，两者联合在一起构成了一个 16 位的定时/计数器。单片机复位后为全 0。当用作定时器时，需按定时长度计算出计数初值。

设从 T0 计数开始到 T0 计数溢出，应有

$$T0 \text{ 初值} + T0 \text{ 计数值} = T0 \text{ 计数器的模} = 216$$

则：

$$T0 \text{ 计数值} = 216 - T0 \text{ 初值}$$

$$T0 \text{ 定时时间 } t = \text{信号时钟周期} \times T0 \text{ 计数值}$$

所以定时时间  $t$  和计数初值的关系可以表示为

$$t = \frac{12}{f_{\text{osc}}} \times (2^{16} - \text{T0初值})$$

已知定时时间，求计数初值的公式为

$$\text{T0初值} = 2^{16} - \frac{f_{\text{osc}} \times t}{12}$$

例如，某 80C51 单片机系统的晶振频率为 12MHz，定时时间为 200μs，使用定时器 0 工作于方式 1，则计数初值为

$$\begin{aligned} \text{T0初值} &= 2^{16} - \frac{f_{\text{osc}} \times t}{12} = 65536 - \frac{12 \times 10^6 \text{ Hz} \times 200 \times 10^{-6} \text{ s}}{12} \\ &= 65536 = 0\text{FF}38\text{H} \end{aligned}$$

TH0 和 TL0 分别设置计数初值，即 TH0=0FFH，TL0=38H。

设置好初值后，启动定时/计数器 0 开始工作，计数器从计数初值开始计数，在时钟信号的每个下降沿到来时，计数值加 1，当计数值达到 FFFFH 后，这时如果再来一个下降沿，计数值溢出，向中断请求标志位 TF0 进位，并可以向 CPU 申请中断，然后计数值从 0 开始计数，然后循环不停。使用定时功能时，为了保证每次定时时间的一致性，通常会在定时/计数器的中断服务子程序中重新设置计数初值。如果不重新设置初值，那么在计数值溢出后，计数值从 0 开始，计数 65536 次后溢出。当不需要继续定时，可以通过软件把 TR0 清 0，关闭计数器。

## (2) 方式 0：13 位定时/计数器

图 7.10 为方式 0 的结构图，将之与图 7.9 对比后可以发现，除了用于计数的位数不同外，方式 0 和方式 1 的结构和原理完全相同。

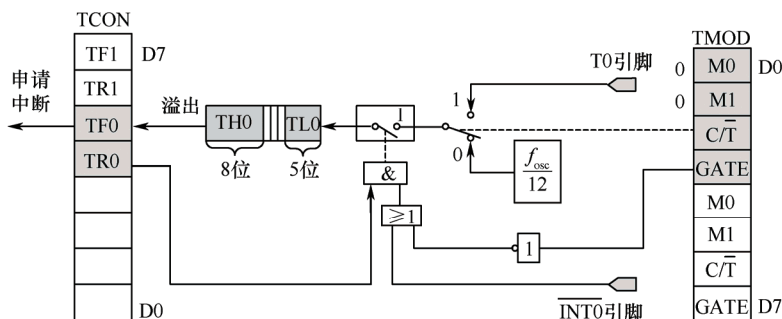


图 7.10 T0 方式 0 结构图

13 位定时/计数器是 MCS-48 单片机的功能，为了向下兼容，80C51 系列单片机设置了这个工作方式。方式 0 是 13 位定时/计数器，由 TH0 的 8 位再加上 TL0 的低 5 位，构成了一个 13 位定时计数器。当 TL0 的低 5 位计满溢出时，直接向 TH0 进位。

方式 0 定时时间的计算公式为

$$t = \frac{12}{f_{\text{osc}}} \times (2^{13} - \text{T0初值})$$

已知定时时间，求计数初值的公式为

$$\text{T0初值} = 2^{13} - \frac{f_{\text{osc}} \times t}{12}$$

例如，某 80C51 单片机系统的工作时钟为 6MHz，定时时间为 600μs，使用定时器 0 工作于方式 0，则计数初值为

$$\begin{aligned} T0 \text{初值} &= 2^{13} - \frac{f_{\text{osc}} \times t}{12} = 8192 - \frac{6 \times 10^6 \text{ Hz} \times 600 \times 10^{-6} \text{ s}}{12} \\ &= 7892 = 1\text{ED}4\text{H} = 0001\ 1110\ 1101\ 0100\text{B} \end{aligned}$$

在给 T0 设置初值时,要特别注意,此例中,TH0≠1EH,TL0≠D4H,而是 TH0=11110110=0F6H, TL0=00010100=14H。

### (3) 方式 2: 自动重装的 8 位定时/计数器

方式 2 的结构如图 7.11 所示。方式 2 中,16 位计数器分成独立的两个部分,其中 TH0 作为计数初值寄存器,用于存放和保持初值,初值由软件设置,而 TL0 用作 8 位计数器。

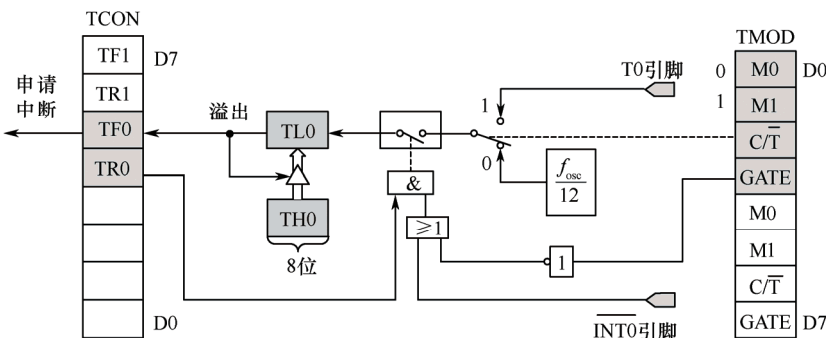


图 7.11 T0 方式 2 结构图

方式 2 的工作原理是:装入初值并启动定时/计数器后,TL0 在时钟信号的下降沿加 1 计数,计数溢出后,向 TF0 进位,并可以申请中断,同时把 TH0 的数据装载到 TL0 中,然后 TL0 从 TH0 保存的计数初值开始计数。在不改变 TH0 值的情况下,方式 2 将会一直自动从 TH0 中加载初始值进行计数,因此称为自动重装方式。

由于方式 2 的计数初值是从 TH0 自动重装的,在计数器一直工作的情况下,方式 2 每次的定时时间都是严格相等的。利用这个特点,常使 80C51 单片机的定时/计数器 1 工作于方式 2,使其作为串行通信接口的波特率发生器。

方式 2 定时时间的计算公式为

$$t = \frac{12}{f_{\text{osc}}} \times (2^8 - \text{TL0初值})$$

已知定时时间,求计数初值的公式为

$$\text{TL0初值} = 2^8 - \frac{f_{\text{osc}} \times t}{12}$$

例如,某 80C51 单片机系统的工作时钟为 3MHz,要求定时时间为 400μs,使用定时器 0 工作方式 2,则计数初值为

$$\begin{aligned} \text{TL0初值} &= 2^8 - \frac{f_{\text{osc}} \times t}{12} = 256 - \frac{3 \times 10^6 \text{ Hz} \times 400 \times 10^{-6} \text{ s}}{12} \\ &= 156 = 9\text{CH} \end{aligned}$$

初值设置为: TL0=9CH, TH0=9CH。

### (4) 方式 3

方式 3 对定时/计数器 0 和 1 是不大相同的。对于 T1,设置为方式 3 时,相当于使 TR1=0,使其停止计数,没有什么实际意义。因此只有定时/计数器 0 可以工作在方式 3。定时/计数器 0

方式 3 的结构如图 7.12 所示。

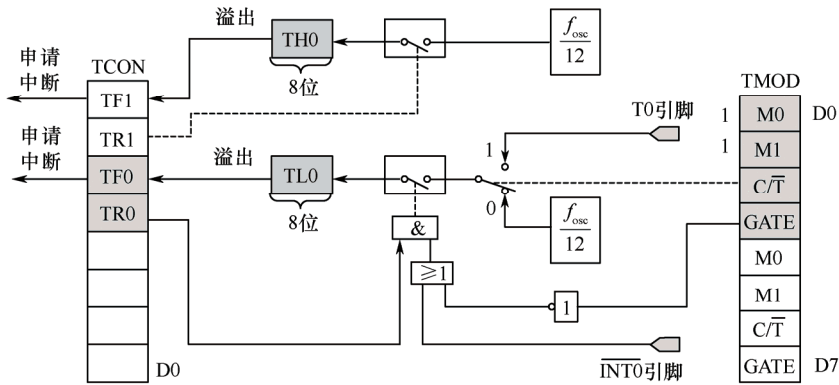


图 7.12 定时/计数器 0 方式 3 结构图

在方式 3 中，T0 被分成两个独立的 8 位定时/计数器 TH0 和 TL0。TL0 的工作原理和控制模式同方式 1 一样，只是此时定时/计数器的位数只有 8 位，其余的控制位和模式选择位与方式 1 相同，其中 TR0 为 TL0 的软件启动控制位，TF0 为 TL0 的中断请求标志位。而 TH0 为另外一个独立的 8 位定时/计数器。从图 7.12 可以看出，TH0 占用定时/计数器 1 的中断请求标志位 TF1 和软件启动控制位 TR1，那么也就意味着相应的定时/计数器 1 的中断入口地址变成 TH0 的中断入口地址。同样 TH0 也没有  $C/\bar{T}$  选择位和 GATE 门控位，因此 TH0 只能使用内部时钟信号来定时，而不能计数，由图 7.12 可见，TH0 被固定为一个只能按定时方式工作的 8 位定时器。

当定时/计数器 0 工作于方式 3 时，定时/计数器 1 还可以工作在方式 0、方式 1 和方式 2，但不能工作于方式 3；定时/计数器 1 的工作模式设为方式 3 时，定时/计数器 1 停止工作。如果定时/计数器 0 工作于方式 3，定时/计数器 1 工作于其他方式时，整个单片机系统相当于有 3 个定时器同时工作，但由于定时/计数器 1 的软件启动位 TR1 被 8 位定时/计数器 TH0 占用，此时定时/计数器 1 会一直工作，直到把其工作方式设为方式 3 才停止工作。同样，定时/计数器 1 的中断请求标志位也被占用，那么定时/计数器 1 不能工作于中断方式，也不能查询 TF1 的状态。当定时/计数器 1 作为计数器时，可以通过主动读取计数器来统计外部事件的发生次数，当作为定时器时，只能通过主动读取计数值来判断定时时间是否结束。

更加常见的做法是，当定时/计数器 0 工作于方式 3 时，可以使定时/计数器 1 工作于方式 2，利用方式 2 自动重载精确定时的特点，使定时/计数器 1 作为串行通信口的波特率发生器，为串行口提供可以设置的波特率。而且在这种情况下，定时/计数器 1 只需启动无须停止，也不用向处理器申请中断。此时定时/计数器 1 的结构图如图 7.13 所示。

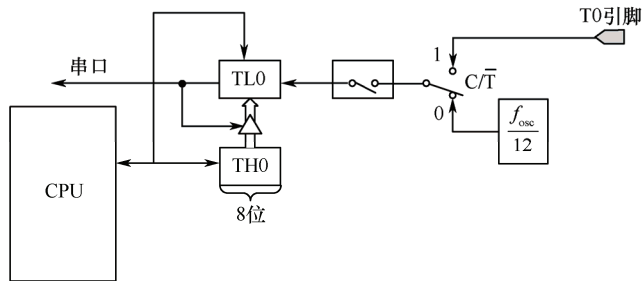


图 7.13 T0 在方式 3 下的 T1 方式 2 结构图

## 5. 定时/计数器的初始化

80C51 单片机的定时/计数器是可编程控制的，这对于定时和计数的使用十分方便。在使用前要先进行初始化，初始化的内容如下。

### (1) 设置中断使能寄存器 IE

80C51 在重启时会将 IE 中的每个中断控制使能位清 0，这时处理器就默认为不能响应中断。因此初始化首先要打开系统需要的中断控制使能位，使相应的中断请求能被处理器响应。同时要注意全局控制使能位  $\overline{EA}$  不要在初始化开始的时候就打开，而是在初始化的最后，甚至是更后面需要的时候才打开全局使能位  $\overline{EA}$ 。这是为了避免系统启动时产生意外的中断。

### (2) 设置计数器模式寄存器 TMOD

根据系统任务的要求，指定正确的定时/计数器工作方式和控制模式。

### (3) 计算和设置计数初值

在需要定时的场合，要根据单片机系统的晶振频率和定时时间来计算出计数初值，并把计数初值输入相应的计数寄存器中。

### (4) 如果定时/计数器工作在中断方式下，这时需要打开全局中断开关 ( $EA=1$ )

### (5) 启动定时/计数器

对 TR0 (TR1) 置 1 后，计数器按前面设置的工作模式和计数初值开始进行计数或定时；同时需要考虑 GATE 控制位，若  $GATE=0$ ，TR0 (TR1) 置 1 后计数器立即开始计数；若  $GATE=1$ ，则计数器等待外部输入信号  $\overline{INT0}$  ( $\overline{INT1}$ ) 引脚变高后且 TR0 (TR1) 置 1 才开始计数。

### (6) 编写计数器主体程序

如果工作在中断方式下，就需要编写相应的中断服务子程序去完成系统设计的任务。如果工作于查询方式下，就需要通过不断查询 TF0 或 TF1 的状态，来判断定时时间是否结束或者计数值是否达到预设值，然后做相应的处理。

## 6. 定时/计数器的应用

定时/计数器是 51 系列单片机的重要组成部分，其工作方式灵活多样，合理使用定时/计数器可获得精炼的程序和简捷的电路结构。下面将从各个方面详细讨论定时/计数器各种方式的应用。

### (1) 通过定时器扩展外部中断源

由于 80C51 的外部中断只有两个，这在很多的实际应用是不够的，如果系统应用中只需要 1 个或不需要定时器时，可以通过计数器来扩展外部中断。

#### 【例 7.1】通过定时/计数器 0 扩展外部中断源。

把按键所产生的下降沿作为一个中断源接到定时/计数器 0 的外部时钟输入脚 T0 (P3.4)。设置定时/计数器 0 为方式 2 自动重装方式，计数器模式，计数初值为 0FFH，中断使能打开。当外部时钟输入产生下降沿时，计数溢出，TF0 置位，产生中断。由于工作在方式 2，所以自动重装初值 0FFH，外部再次输入下降沿，则产生新的中断。由此就扩展了一个下降沿有效的外部中断源。仿真电路如图 7.14 所示，图中数码管初始化显示为 0，每当按一次按键就会产生一个下降沿，数码管显示的数字就会加 1，从 0 一直到 F 循环显示。

软件仿真过程如下：结合 Proteus 和 Keil C51 两种软件，本例采用 Proteus 8 Professional 中的 ISIS 功能模块来完成单片机系统的搭建和仿真，Keil C51 用来完成汇编或 C51 语言的程序编写、调试和编译。

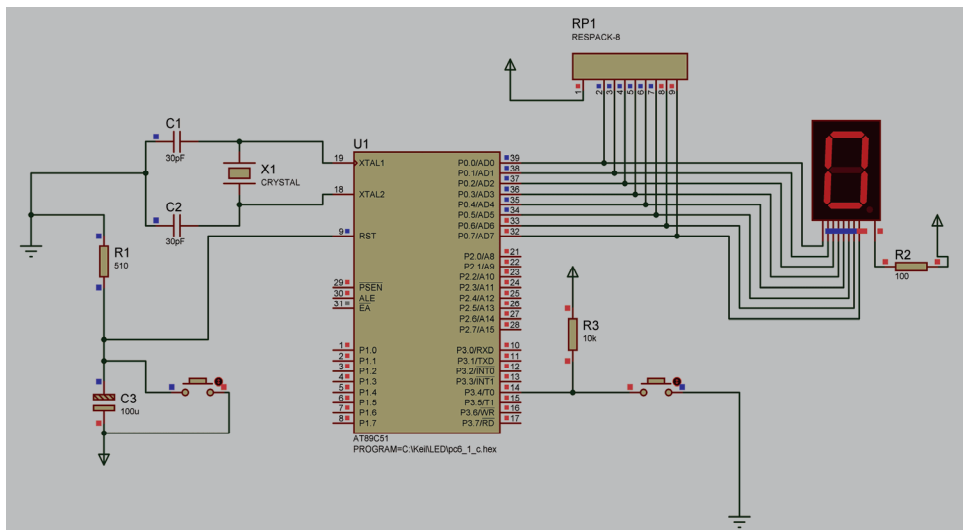


图 7.14 例 7.1 的 Proteus 仿真系统图

参考代码如下:

汇编程序:

```

ORG 0000H
AJMP MAIN_START

ORG 000BH                                ;定时/计数器 0 的中断入口地址
AJMP INT_T0_EEX0_HANDLE                  ;跳转到中断服务子程序
ORG 0030H
INT_T0_EEX0_HANDLE:                      ;中断服务子程序
CLR EA                                  ;关总中断,防止保护现场出现意外,同时也是禁止中断嵌套
PUSH PSW                                ;保护现场
PUSH ACC
INC R2                                  ;R2 保存的是数码管所显示的数字,R2 加 1
MOV A,R2
CJNE A,#10H,PC2                          ;判断 R2 是否等于 10H,不等跳转到 PC2,相等顺序执行
MOV R2,#00H
MOV A,R2
PC2: MOV DPTR,#TAB                        ;查表
MOVC A,@A+DPTR
MOV P0,A
POP ACC                                  ;恢复现场
POP PSW
SETB EA                                  ;开全局中断
RETI                                     ;中断返回
ORG 0100H
MAIN_START: MOV R2,#00H                    ;主程序入口地址
MOV A,R2;                                ;查表操作,取出数码管显示数字对应的段码
MOV DPTR,#TAB
MOVC A,@A+DPTR
MOV P0,A                                ;数码管显示

```

```

SETB  ET0                      ;允许定时/计数器 0 中断
MOV   IP,#00H                 ;所有中断源均为低优先级
ANL   TMOD,#0F0H              ;定时/计数器 0 工作在计数模式,门控无效,工作方式 2
ORL   TMOD,#00000110B
MOV   TH0,#0FFH               ;设置计数初值
MOV   TL0,#0FFH
SETB  TR0                     ;启动定时/计数器 0
SETB  EA                       ;开全局中断
STOP:AJMP $                    ;等待外部中断到来
TAB: DB  0C0H,0F9H,0A4H,0B0H,99H,92H,82H,0F8H    ;共阳极段码表,0~F
      DB  80H,90H,88H,83H,0C6H,0A1H,86H,8EH
      END

```

#### C51 语言程序:

```

#include <reg51.h>              //添加头文件
#define uchar unsigned char    //宏定义,主要是为了便于编写程序
#define uint unsigned int

uchar code table[]={0xc0,0xf9,0xa4,0xb0,          //共阳极段码表
                    0x99,0x92,0x82,0xf8,
                    0x80,0x90,0x88,0x83,
                    0xc6,0xa1,0x86,0x8e};

uchar LED=0;                    //数码管显示数据变量

void main()
{
    P0=table[LED];              //数码管初始化显示 0
    ET0=1;                      //允许定时/计数器 0 中断
    IP=0x00;                    //初始化,所有中断源均为低优先级
    TMOD=0x06;                  //定时/计数器 0 工作在计数模式,门控无效,工作方式 2
    TH0=0xff;                   //设置计数初值
    TL0=0xff;
    TR0=1;                      //启动 T0
    EA=1;                       //开全局中断
    while(1);                   //死循环,等待中断产生
}

void int_ext0() interrupt 1 using 1    //定时/计数器中断服务程序,使用寄存器组 1
{
    EA=0;
    LED=LED+1;
    if(LED==16)
    {LED=0;}
    P0=table[LED];
    EA=1;
}

```



## (2) 定时器模式的应用

**【例 7.2】** 设单片机的晶振频率为 12MHz，现要求从 P1.0 输出频率为 5kHz 的方波。

由于需要输出频率为 5kHz 的方波，则方波周期为 200μs，那么高低电平时间各为 100μs，则定时时间为 100μs。

方法 1: 使用定时/计数器 1，方式 1，中断方式

方式 1 的计数初值为

$$T1\text{初值} = 2^{16} - \frac{f_{\text{osc}} \times t}{12} = 65536 - \frac{12 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-6}}{12} = 65436 = \text{FF9CH}$$

则 TH1=0FFH，TL1=9CH。

定时/计数器 1 工作于方式 1，内部时钟源，软件启动，由于没有用到定时/计数器 0，那么 T0 相应控制位全为 0 即可，则 TMOD=00010000B=10H。中断方式下，需要打开定时/计数器 1 的中断使能子开关，则 ET1=1，最后打开全局中断使能位，EA=1。初始化设置 P1.0 为 0，在中断服务子程序中翻转 P1.0。需要注意的是，每次溢出后，执行中断服务子程序，中断请求标志位 TF1 由硬件自动清除，且需要软件重设计数初值。

系统仿真图如图 7.15 所示。

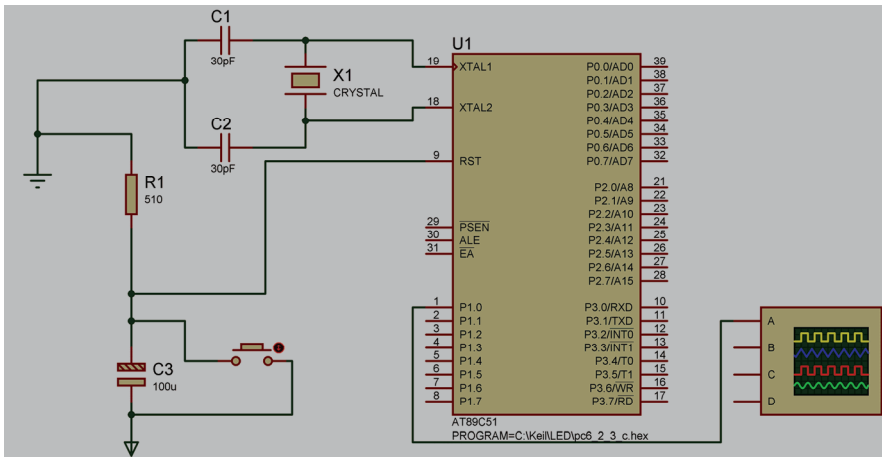


图 7.15 例 7.2 系统仿真图

参考代码如下：

汇编程序：

```
ORG 0000H
AJMP MAIN_START
ORG 001BH ;定时/计数器 1 中断服务程序入口地址
AJMP INT_T1_HANDLE

ORG 0030H
INT_T1_HANDLE: MOV TH1, #0FFH ;重设初始值
MOV TL1, #9CH
CPL P1.0 ;P1.0 翻转
RETI
ORG 0100H
MAIN_START: MOV TMOD, #10H ;设置计数器工作模式为 1
```

```

        SETB  ET1                ;开定时/计数器 1 中断
        MOV   TH1,#0FFH          ;设置初始值
        MOV   TL1,#9CH
        CLR   P1.0                ;清 P1.0 为零
        SETB  EA                  ;开全局中断
        SETB  TR1                 ;启动定时/计数器 1
WAIT:  AJMP  $                    ;循环等待
        END

```

#### C51 语言程序:

```

#include <reg51.h>                //添加头文件
#define uchar unsigned char
#define uint unsigned int
sbit P10=P1^0;                    //位定义

void main()                        //主程序
{
    TMOD=0x10;                    //定时/计数器 1 工作在定时模式,方式 1
    ET1=1;                        //开定时/计数器 1 中断
    TH1=0xff;                     //设置计数初值
    TL1=0x9c;
    P10=0;                        //初始化输出为低电平
    TR1=1;                        //启动 T1,开始计时
    EA=1;                         //开全局总中断
    while(1);                     //无限循环,等待中断产生
}

void int_ext1() interrupt 3 using 1 //定时/计数器 1 中断服务程序,使用寄存器组 1
{
    TH1=0xff;                     //重新设置计数初值
    TL1=0x9c;
    P10=~P10;                     //P1.0 电平翻转
}

```

系统仿真后,可以估算出方波的频率约为 4.761kHz,这同我们所设计的频率有一定的误差。这主要是因为采用中断方式,跳转到中断服务子程序需要一定的时间,且中断服务子程序中除了电平翻转外,还执行了重设计数初值的指令。

若采用查询方式,其汇编源程序:

```

ORG 0000H
AJMP MAIN_START
ORG 0100H
MAIN_START:
MOV  TMOD,#10H                ;设置计数器工作模式为 1
MOV  TH1,#0FFH                ;设置初始值
MOV  TL1,#9CH
SETB  TR1                      ;启动定时/计数器 1
WAIT:JNB TF1, $                ;循环等待

```

```

CLR  TF1                ;软件清除 TF1 中断申请标志
MOV  TH1, #0FFH        ;重设初始值
MOV  TL1, #9CH
CPL  P1.0              ;P1.0 翻转
SJMP WAIT
END

```

对应的 C51 源程序：

```

#include <reg51.h>      //添加头文件
#define uchar unsigned char
#define uint unsigned int
sbit P10=P1^0;         //位定义
void main()            //主程序
{
    TMOD=0x10;          //T1 工作在定时模式，方式 1
    TH1=0xff;           //设置计数初值
    TL1=0x9c;
    TR1=1;              //启动 T1，开始定时
    while(1)
    {while(TF1==0);     //查询等待 TF1 变为 1
      TF1=0;            //软件清除 TF1 中断请求标志位
      TH1=0xff;         //重新载入计数初值
      TL1=0x9c;
      P10=~P10;
    }
}

```

请读者完成仿真，观察信号频率值，分析其误差原因。

**方法 2：**使用定时/计数器 1，方式 2，中断方式

在方法 1 中，中断跳转和每次软件重装计数初值都会产生额外的时间，因此实际产生的方波周期不是 200μs。使用方式 2 就可以改善这个问题。

方式 2 的计数初值为

$$T1\text{初值} = 2^8 - \frac{f_{\text{osc}} \times t}{12} = 256 - \frac{12 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-6}}{12} = 156 = 9\text{CH}$$

则 TL1=9CH，TH1=9CH。

定时/计数器 1 工作在方式 2，只需设置 TMOD=00100000B=20H，其余设置同前一样。

参考代码如下：

汇编程序：

```

ORG  0000H
AJMP MAIN_START
ORG  001BH                ;定时/计数器 1 中断服务程序入口地址
AJMP INT_T1_HANDLE

ORG  0030H
INT_T1_HANDLE: CPL  P1.0    ;P1.0 翻转
                RETI

```

```

                ORG 0100H
MAIN_START:    MOV  TMOD,#20H           ;设置计数器工作模式为 2
                SETB ET1                ;开定时/计数器 1 中断
                MOV  TH1,#9CH           ;设置初始值
                MOV  TL1,#9CH
                CLR  P1.0                ;清 P1.0 为零
                SETB EA                  ;开全局中断
                SETB TR1                 ;启动定时/计数器 1
WAIT:          AJMP $                   ;等待中断发生
                END

```

### C51 语言程序:

```

#include <reg51.h>           //添加头文件
#define uchar unsigned char
#define uint unsigned int
sbit P10=P1^0;              //位定义

void main()                  //主程序
{
    TMOD=0x20;               //定时/计数器 1 工作在定时模式,方式 2(自动重载)
    ET1=1;                   //开定时/计数器 1 中断
    TH1=0x9c;                //设置计数初值
    TL1=0x9c;
    P10=0;                   //初始化输出为低电平
    TR1=1;                   //启动 T1,开始计时
    EA=1;                    //开全局总中断
    while(1);                //无线循环,等待中断产生
}

void int_ext1() interrupt 3 using 1 //定时/计数器 1 中断服务程序,使用寄存器组 1
{
    P10=~P10;                //P1.0 电平翻转
}

```

仿真后，由得到的波形估算，得到的频率为 5.000kHz。可见采用自动重载的方式，得到的波形比方法 1 更精确。

### (3) 计数器模式的应用

作为计数器使用时，需要读取计数结果，但需要特别注意的是，在读取计数值时，计数仍在进行，若先读高 8 位，后读低 8 位，则可能在两次读取的间隔中发生进位，比如读数前计数值为 75FFH，先读出高 8 位为 75H，此时加 1 计数，则计数值为 7600H，接着再读低 8 位，变成 00H，最后把两个结果拼接就变成了 7500H 的错误结果；反过来，先读低 8 位，再读高 8 位也有同样的问题。

解决办法是：先读高 8 位，再读低 8 位，再读高 8 位，比较两次读取的高 8 位值是否一致，一致则正确；不一致则错误，然后重读。

【例 7.3】在某个会场上，专门设置了人员入口和出口，为了安全需要，会场内只允许 1000 人同时在场。当人数到达 1000 人时，入口亮红灯，门卫阻止人员进入。

现使用 80C51 进行设计，统计人数。为了简化程序，暂时不考虑中途有人退场的情况。系统使用定时/计数器 0 工作，每次进入 1 人，人员统计的传感器就向 T0（P3.4）脚输出一个负脉冲，在仿真中，我们用一个按钮来产生下降沿。门口的红灯由 P1.0 引脚控制，高电平灯亮。

本系统中，使用定时/计数器 0 统计外部事件，用作计数器，需要选择外部时钟，不需要使用中断；计数值最大为 1000，使用方式 1 和方式 0 都可以，在此选用方式 1。TMOD=00000101=05H，把人数统计的高 8 位放在 30H，低 8 位放在 31H。

仿真系统图如图 7.16 所示。为方便验证，设初值人数为 995 人，当人数达到 1000 人，数码管轮流显示数字和英文 HOLD，并且红灯亮。在系统中还另外加了一个按钮输入负脉冲到外部中断 0 输入引脚，该按钮是用来清零的，使数码管显示人数为 0。

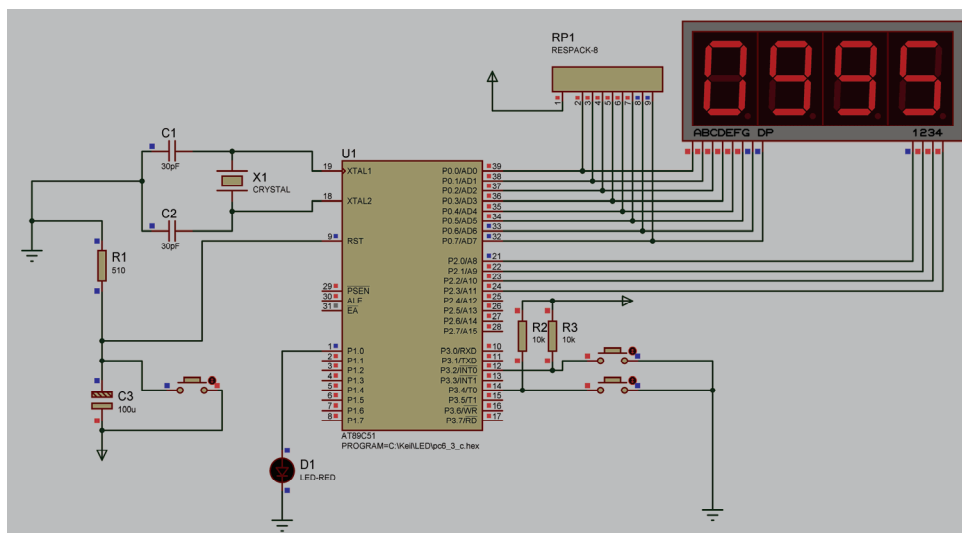


图 7.16 例 7.3 仿真框图

在不考虑 LED 显示和清零按钮时，汇编程序代码如下：

```

ORG 0000H
AJMP MAIN_START
ORG 0100H
MAIN_START: MOV TMOD, #05H      ;设置定时/计数器 0 为方式 1,计数器模式
            MOV TH0, #03H      ;计数值设为 995(=03E3H)
            MOV TL0, #0E3H
            CLR P1.0           ;关闭红灯
            SETB TR0           ;启动计数器
COUNT:    MOV 30H, TH0        ;读高 8 位计数结果
            MOV 31H, TL0        ;读低 8 位计数结果
            MOV A, TH0          ;第二次读高 8 位计数结果
            CJNE A, 30H, COUNT ;比较两次读取 TH0 是否一致,不一致则重读
CHECK:     CLR C               ;清零进位标志,为了后面减法正确
            SUBB A, #03H        ;做减法比较是否小于 768 (300H)
            JC COUNT           ;小于则继续计数
            MOV A, 31H          ;等于 300H,再判断低 8 位是否小于 232(232+768=1000)

```

```

        SUBB  A,#0E8H          ;
        JC   COUNT            ;小于继续计数
        SETB  P1.0            ;等于,则表示达到 1000 人,亮红灯
STOP:    AJMP  STOP
        END

```

#### C51 语言程序:

```

#include <reg51.h>
#define uchar unsigned char
#define uint unsigned int
sbit LED=P1^0;

uint count=0;           //全局计数值
uchar ch=0;             //保存 TH0 的第一次读取值
uchar cl=0;             //保存 TL0 的读取值
uchar ch2=0;            //保存 TH0 的第二次读取值

void init()             //初始化子程序
{
    TMOD=0x05;          //T0 工作于计数模式,方式 1
    TH0=0x03;           //计数初值=995=0x3e3
    TL0=0xe3;
    LED=0;              //红灯灭
    TR0=1;              //启动 T0 开始计数
}

void main()
{
    init();             //调用初始化子程序
    while(1)
    {
        ch=TH0;         //第一次读取 TH0 的计数值
        cl=TL0;         //读取 TL0 的计数值
        ch2=TH0;        //第二次读取 TH0 的计数值
        while(ch!=ch2)  //如果 TH0 的第一次和第二次读取值不相等,重新读取,直到相等为止
        {
            ch=TH0;
            cl=TL0;
            ch2=TH0;
        }
        count=TH0*256+TL0; //根据 TH0 和 TL0 的读取值计算出当前计数值
        if(count>=1000)    //如果计数值大于等于 1000,红灯亮
        {
            LED=1;
        }
    }
}

```

若考虑 LED 显示和清零按钮时,需要考虑显示数据的十六进制和十进制转换、显示代码子程序等问题,汇编及 C 语言参考源程序在“程序附件”中,请登录华信教育资源网 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn) 下载。

## 本章小结

本章首先介绍了中断的概念以及一般的中断处理过程,详细介绍了单片机处理中断的特有过程,包括单片机如何跳转到相应的中断服务子程序,单片机的中断优先级和中断嵌套,并介绍了与单片机中断相关的特殊功能寄存器 IE 和 IP。同时由于单片机的定时和计数功能经常使用中断方式,详细介绍了 80C51 单片机中的定时/计数器,分析了定时/计数器的结构,讨论了特殊功能寄存器 TMOD 和 TCON 是如何对单片机的定时/计数器来进行控制的;详细讨论了定时/计数器的 4 种工作方式。最后介绍了定时/计数器的初始化和相应的应用实例。

本章是介绍 80C51 单片机上功能部件的初始章节,从本章开始我们会涉及单片机具体的功能部件及其实际应用。可以发现,对单片机的功能控制,实际上就是对单片机内部相关的功能寄存器进行操作。本章要掌握与 80C51 单片机的中断系统和定时/计数器相关的特殊功能寄存器的使用方法;掌握单片机处理中断的过程和定时/计数器 4 种工作模式,以及区别汇编和 C51 语言对中断处理的不同编程方法。

## 思考题及习题

- 7.1 什么是断点、中断源、中断服务程序、中断程序入口地址?
- 7.2 80C51 单片机的中断系统有几个中断源?几个中断优先级?中断优先级是如何控制的?在出现同级中断申请时,CPU 按什么顺序响应(按由高级到低级的顺序写出各个中断源)?各个中断源的入口地址是多少?
- 7.3 保护断点保护什么?是怎么保护的?中断返回后的下一步到哪里去?
- 7.4 保护现场有什么作用?在 80C51 中保护现场和保护断点有什么区别?
- 7.5 80C51 各中断源对应的中断服务程序的入口地址是否能任意设定?如果想将中断服务程序放置在程序存储区的任意区域,在程序中应该做何种设置?请举例加以说明。
- 7.6 简述子程序调用和执行中断服务程序的异同点。
- 7.7 80C51 单片机开总中断允许的指令是\_\_\_\_,初始化时一般在什么位置开总中断允许?
- 7.8 当 80C51 某个中断源有中断请求时,处理器响应这个中断的条件是什么?
- 7.9 简述 80C51 的各个中断源是如何撤销中断的。
- 7.10 80C51 单片机的定时/计数器可选择\_\_\_\_个时钟源,当选择外部时钟源时,通常作为\_\_\_\_,当选择内部时钟源时,通常用为\_\_\_\_。
- 7.11 80C51 单片机的定时功能和计数功能本质上有区别吗?为什么?
- 7.12 80C51 单片机中的定时/计数器选择外部时钟源有什么限制?为什么?
- 7.13 当 80C51 单片机中的门控位 GATE 为 0 时,怎么启动定时/计数器?当门控位 GATE 为 1 时,又怎么启动定时/计数器?
- 7.14 80C51 单片机中的定时/计数器有几种工作方式?方式 0 和方式 1 有什么异同点?
- 7.15 当定时/计数器 T0 工作在方式 3 时,T1 可以工作在哪些方式?这时我们常把定时/计数器 1 设置成什么工作方式?为什么?
- 7.16 某一个实际应用中,使用到定时/计数器 0 和外部中断 0,其中外部中断设为下降沿触发,低优先级,

定时/计数器 0 工作于方式 1，软件启动，高优先级，中断模式。其余未使用到的中断源全部关闭。初始化时开全局中断，那么 IE=\_\_\_\_，IP=\_\_\_\_，TMOD=\_\_\_\_，IT0=\_\_\_\_。

7.17 执行以下代码的作用是\_\_\_\_\_。

```
ANL  TMOD,#0FH
```

```
ORL  TMOD,#50H
```

7.18 若某单片机系统的晶振为 6MHz，使用定时/计数器 0，进行 800μs 定时，可以使用哪些工作方式？为什么？要求软件启动，中断方式，试编写各种方式下的初始化程序。

7.19 设单片机系统的晶振为 12MHz，要求使用定时/计数器 1，中断模式，自动重载方式，输出周期为 200μs，占空比为 50%的方波，从 P1.0 输出，初始化 P1.0 为高电平。分别用汇编和 C51 语言进行编写。

7.20 仿真系统图如 7.17 所示，其中晶振 12MHz，单刀双掷开关 SW1(P2.0)接高电平时，设置外部中断 0 为下降沿触发方式；当 SW1 接低电平时，设置为低电平触发方式。初始化时 LED（P1.7）灯灭，外部中断 0 有中断产生时，LED 灯闪烁 5 次，亮 250ms，灭 250ms，采用定时/计数器 0 定时 50ms，工作方式 1，中断模式，定时中断为高级中断优先级。试编写其 C51 语言程序，并说明下降沿触发时和电平触发时的不同之处。

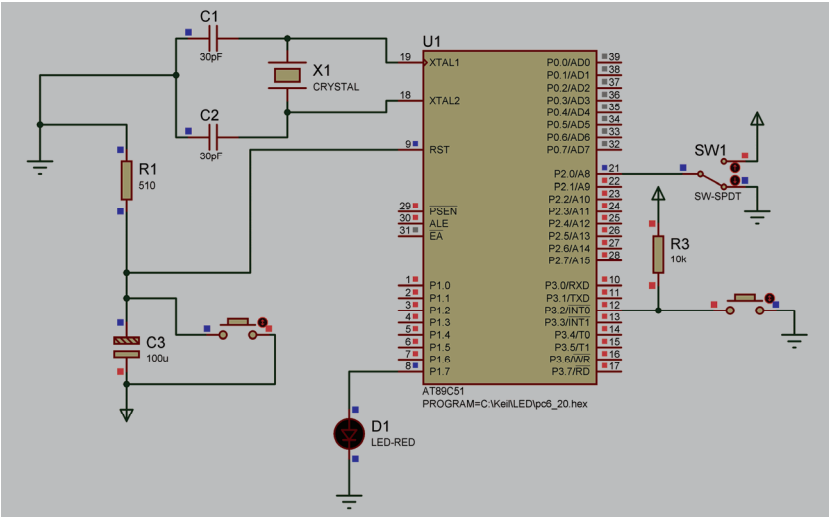


图 7.17 习题 7.20 的仿真系统图



## 第8章 80C51 单片机的串行口及串行总线扩展

随着网络化和分布式应用系统的发展，单片机应用系统间的数据通信功能越来越重要。在数据通信领域内，按每次传送的数据位数，可将数据通信分为并行通信和串行通信两种通信方式。本章主要介绍串行通信的基本常识，MCS-51 单片机串行口 UART 的结构、工作方式及其应用，并简单介绍单片机串行总线扩展技术、I<sup>2</sup>C 总线和 SPI 总线的原理及应用。

### 8.1 串行通信基本知识

通信是指不同应用系统或设备间的信息传输。不同的通信方式下，通信终端之间的连线结构和数据传送方式不同，其特点和适用范围也不同。本节主要介绍串行通信的工作方式、分类及串行通信的波特率等基本概念。

#### 8.1.1 基本通信方式及特点

数据通信的两种基本方式：并行通信和串行通信。

并行通信是指各个数据位同时进行传送的数据通信方式，每个数据位使用单独的一条导线，一个传送单位（以字或字节为传送单位）有多少位数据就需要多少根数据线。并行通信的特点是各数据位同时传送，传送速度快、效率高，但成本高，一般只适用于短距离（传送的距离小于 30m）数据通信。计算机内部的数据传送一般采用并行方式。

串行通信的数据传输是逐位传输的，只需使用一条数据线，将数据一位一位地依次传输，每一位数据占据一个固定的时间长度。这种通信方式只需要少数几条线就可以在系统间交换信息，其特点是速度慢，但成本低，非常适用于较长距离数据传输，计算机与外界的数据传送大多数是串行的，其传送的距离可以从几米到几千千米。

#### 8.1.2 串行通信的数据传送方式

串行通信的数据传送方式有单工、半双工、全双工等方式。

##### 1. 单工（Simplex）方式

单工方式的数据仅按一个固定方向传送，通信双方一方固定为发送端，另一方固定为接收端，数据只能由发送设备单向传输到接收设备，如图 8.1（a）所示。

##### 2. 半双工（Half-duplex）方式

半双工也称准双工，半双工方式的数据传送是双向的，但与全双工不同，其发送和接收不能同时进行，即任意时刻只能由其中的一方发送数据，另一方接收数据。因此半双工形式可以使用一条数据线，如图 8.1（b）所示。

##### 3. 全双工（Full-duplex）方式

全双工方式的数据传送是双向的，两串行通信设备之间的数据传送可向两个方向传送，且可同时进行发送和接收数据，因此全双工形式的串行通信需要两条数据线，如图 8.1（c）所示。

各种通信方式都有着广泛的应用，实际应用中可以根据不同的场合和对数据交换的不同要求选用不同的通信方式。

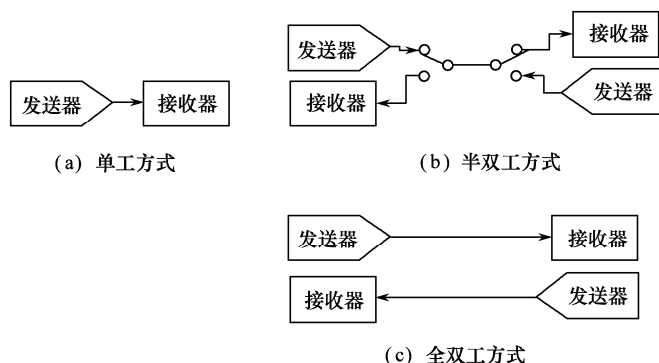


图 8.1 串行通信的数据传送方式

### 8.1.3 串行通信的分类

串行通信分为异步通信和同步通信两种。

#### 1. 同步通信

同步串行通信中，所有设备由同一个时钟源控制，该时钟称为同步时钟。同步串行通信的数据传送是按信息帧（若干个数据字符组成的数据块）进行传输的，通常，每个信息帧包括同步字符、数据块和校验字符。同步通信的数据格式如图 8.2 所示。

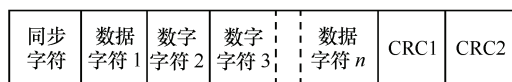


图 8.2 同步通信数据帧格式

同步通信中的同步字符位于数据块开头，标识一帧数据传输的开始；接收端接收到同步字符以后，即准备接收数据。同步字符可以采用统一标准格式，也可以由用户约定。

数据字符在同步字符之后，数据内容由双方约定的协议确定。

检验字符位于数据块末尾，接收端可以通过检验字符对接收到的数据字符的正确性进行检验。

同步通信中的优点是数据传输速率较高，但硬件相对复杂。

#### 2. 异步通信

异步通信和同步通信的主要区别是，在异步串行通信中，接收设备和发送设备不需要同一时钟控制，双方有各自的时钟信号，双方的时钟通常是不同步的（即异步的）。当然，为了保证数据传送的正确，这些时钟的频率必须保持一致（或者频率误差在规定的范围内）。

异步通信中，数据也是一帧一帧传送的，但由于收发双方的时钟可能存在误差，所以异步通信中的帧长度不能太长，其格式通常由一个字节数据构成。典型的异步通信数据帧格式由起始位（低电平）、数据位、奇偶检验位、停止位（高电平）组成，如图 8.3 所示。

图 8.3 中，通信线路在不传送数据时应保持为“1”，发送端通过发送起始位“0”开始一帧的传送，接收端通过接收到的起始位“0”实现一帧的同步，开始一帧数据的接收。

起始位之后是数据位，在数据位中，低位在前，高位在后。数据位可以是 5、6、7 或 8 位。

奇偶校验位用于对字符传送的正确性检查，常见的奇偶校验有奇校验、偶校验和无校验等 3 种。

停止位用以标志一个字符传送的结束，它对应于“1”，处在奇偶校验位之后。停止位可以规定为 1 位、1.5 位或 2 位，在实际应用中根据需要确定。

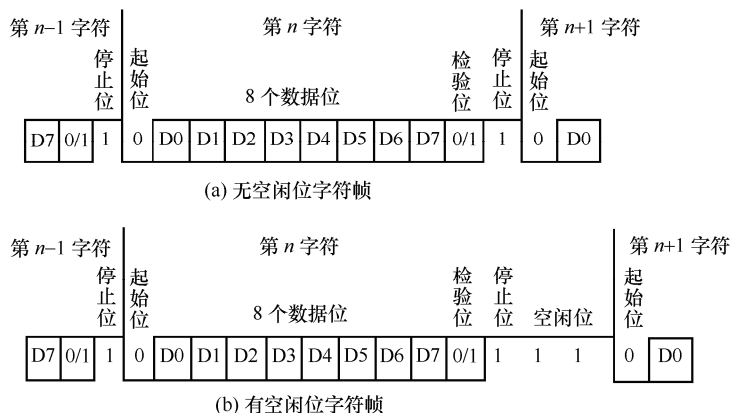


图 8.3 异步通信数据帧格式

### 8.1.4 串行通信的波特率、比特率

波特率是串行通信的重要概念，波特率是指每秒传送信号的数量，单位为波特（B，Baud）。

比特率是指每秒传送的信息量，是有效数据的传输速率，单位是 bps (bit per second) 或 b/s。

例如，通信双方每秒钟所传送数据的速率是 120 字符/秒，每一字符包含 10 位（1 个起始位、8 个数据位、1 个停止位），则比特率为

$$120 \times 10 = 1200 \text{ b/s}$$

在单片机串行通信中，传送的是二进制信息，其波特率、比特率在数值上是相等的。

在串行通信中，相互通信的双方必须具有相同的比特率，否则无法成功地完成串行数据通信。

## 8.2 80C51 单片机的串行口

为了实现串行通信，MCS-51 系列单片机将串行接口电路集成在芯片内部，称为通用异步接收/发送器 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)，UART 成为 MCS-51 系列单片机的标准配置。本节主要介绍 80C51 单片机串行口 UART 的结构、特点、工作方式及简单应用。

### 8.2.1 MCS-51 单片机串行口的结构

MCS-51 单片机内置一个全双工的串行通信接口，可用作同步移位寄存器，也可用作通用异步接收/发送器 UART，其结构如图 8.4 所示。串行数据从 RxD(P3.0)引脚输入，从 TxD(P3.1)引脚输出。

串行口由数据缓冲器、移位寄存器、串行控制寄存器和波特率发生器等组成。数据缓冲器由两个互相独立的同名的 (SBUF) 接收、发送缓冲器构成，可以同时发送和接收数据。发送缓冲器只能写入而不能读出，接收缓冲器只能读出而不能写入，因而两个缓冲器可以公用一个地址码。串行口的两个缓冲器公用的地址码是 99H，物理上对哪个缓冲寄存器操作的确定是用读、写指令加以区分的。例如，指令 MOV SBUF A 则是对发送缓冲器写入，而指令 MOV A,SBUF 则是对接收缓冲器读出。



• 169 •

到的前 8 位数据送入 SBUF，并发出中断申请。在工作方式 1 时，若 SM2=1，当接收有效停止位时，置 RI=1，数据有效；没有接收到有效停止位时，RI=0，数据无效。在工作方式 0 时，SM2 不用，设置为 0。

REN：允许串行接收控制位，REN=0 时禁止串行接收数据；REN=1 时允许并启动串行接收数据。REN 由软件置位/清 0。

TB8：在方式 2、3 中，是要发送的第 9 位数据，由软件写入 1 或 0，方式 0、方式 1 不用；SM2=0 时，可用于奇偶校验；SM2=1 时，用作判断地址帧/数据帧，TB8=0 表示发送的是数据，TB8=1 表示发送的是地址。

RB8：在方式 2、3 中，由硬件存放接收到的第 9 位数据；SM2=0 时，可作为奇偶校验；SM2=1 时，用作区别地址帧/数据帧的标志。在方式 1 时，SM2=0，RB8 接收的是停止位。在方式 0 时，RB8 不用。

TI：发送中断标志位，用于指示一帧信息发送是否完成，可位寻址。发送完一帧信息，由硬件置 TI 为 1，同时申请中断。在发送数据前，TI 必须由软件清 0。

RI：接收中断标志位，用于指示一帧信息是否接收完成，可位寻址。接收到一帧有效信息后，由硬件置 RI 为 1，同时申请中断。RI 必须由软件清 0。

2. 电源控制寄存器 PCON

PCON 主要是为实现电源控制而设置的专用寄存器，字节地址为 87H，不可位寻址，PCON 的格式见表 8.3。

表 8.3 PCON 寄存器格式

PCON	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
(87H)	SMOD	—	—	—	GF1	GF0	PD	IDL

PCON 的 GF1、GF0、PD 和 IDL 位与串行通信无关，用于单片机的电源控制。SMOD 为波特率加倍位，串行方式 1、2、3 时，SMOD=0 时，波特率不加倍；SMOD=1 时波特率加倍。系统复位时，默认为 SMOD=0。

3. 串行通信的工作方式

MCS-51 单片机的串行通信口接口有 4 种工作方式，分别为方式 0、方式 1、方式 2、方式 3。

(1) 工作方式 0

当 SM0 SM1=00 时，串行口工作在方式 0。串行口作为 8 位同步移位寄存器使用，波特率固定为  $f_{osc}/12$ 。发送/接收数据时，以 8 位数据为 1 帧，不设起始位和停止位，串行数据由 RxD (P3.0) 逐位移出或移入（低位在先，高位在后）；TxD (P3.1) 输出移位时钟，频率为系统时钟频率  $f_{osc}$  的 1/12。

方式 0 下的串行口输出，一般与“串入并出”的移位寄存器配合（如 74LS164 等），就可把串行口变为并行输出口使用；串行口输入一般与“并入串出”的移位寄存器配合（如 74LS165 等），就可把串行口变为并行输入口使用。

工作方式 0 下，串行口的发送条件是 TI=0；接收条件是 RI=0 且 REN=1（允许接收数据）。方式 0 下的扩展电路如图 8.5 所示。

【例 8-1】用 8031 串行口连接两片并入串出移位寄存器 74LS165，扩展 1 个 16 位的并行输入口，编程实现从 16 位并行口输入 10 次数据（20 次 8 位数据），存入 50H 开始的内部 RAM 区。

解 如图 8.6 为 16 位并行输入扩展电路。P3.2 接移位/置入控制端  $\overline{SH}/\overline{LD}$ ，低电平时开关

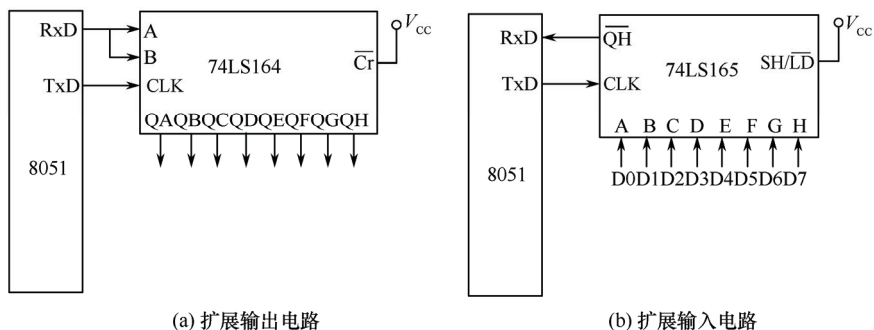


图 8.5 串行口方式 0 扩展电路

数据置入内部移位寄存器，为高电平时时钟 CLK 有效，可从 RxD 串行移位读入移位寄存器中的开关数据。

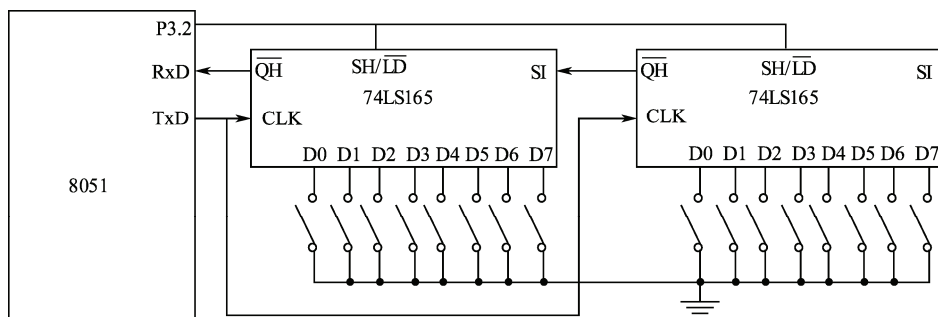


图 8.6 16 位并行输入扩展电路

数据读入子程序 RECEIVE16B:

```

FLAGA      EQU  20H
DATANUMBER EQU  20H
FIRSTBUF    EQU  50H
WORK_FLG    BIT  FLAGA.0
SHLD        BIT  P3.2

RECEIVE16B: MOV  R7, #DATANUMBER
             MOV  R0, #FIRSTBUF
             SETB WORK_FLG
             MOV  SCON, #00H
             CLR  RI
             SETB WORK_FLG

RCV0:        CLR  REN
             CLR  SHLD
             SETB SHLD

RCV1:        SETB REN
             JNB  RI, $
             CLR  RI
             MOV  A, SBUF
             MOV  @R0, A
             INC  R0

```

```

CPL WORK_FLG
DJNZ R7, RCV2
RET
RCV2: JNB WORK_FLG, RCV1
      SJMP RCV0

```

【例 8-2】用 8051 串行口外加移位寄存器 74LS164 扩展 16 位输出口，输出两位 7 段显示码，在 LED 上显示。

解 如图 8.7 所示为在 Proteus 上的仿真原理图，用查询法编程，以下是在两数码管上分别显示 1 和 0 的程序段，通过查表找到 7 段显示码，从串行口输出，由 7 段显示器来显示。

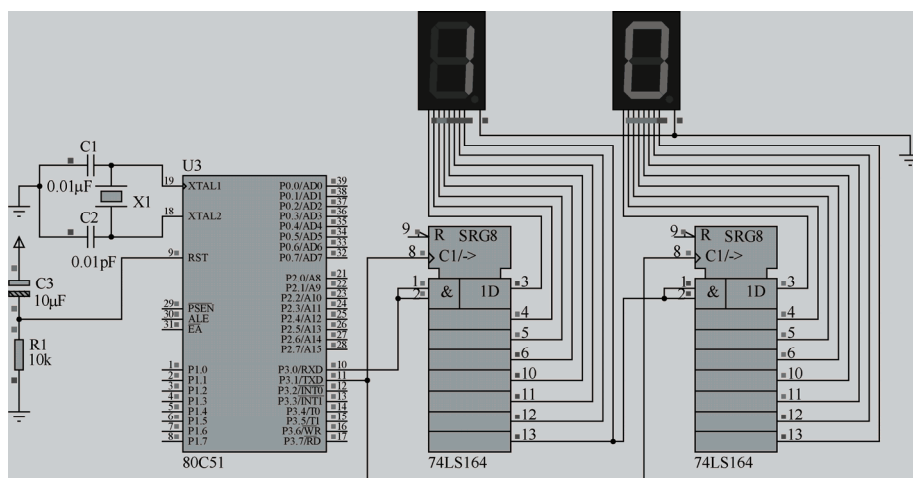


图 8.7 例 8-2 仿真图

```

#include<reg52.h>
void main(){
    unsigned char i;
    unsigned char temp[10] = {0xFC,0x60,0xDA,0xF2,0x66,0xB6,0xBE,0xE0,0xFE,
    0xF6};
    SCON = 0x00; //SM0=0, SM1=0, 设置串口工作方式 0
    for(i=0;i<2;i++){
        SBUF = temp[i];
        while(!TI); //等待数据发送完成
        TI = 0; //清除发送中断标志位
    }
    while(1);
}

```

## (2) 工作方式 1

当 SM0 SM1=01 时，串行口工作在方式 1。方式 1 为 8 位 UART 格式，一帧信息为 10 位：1 位起始位，8 位数据位(低位在先)和 1 位停止位，波特率可变，由定时/计数器 1 的溢出率及 SMOD (PCON.7) 决定，即可根据需要进行设置。该方式下，串行口为全双工接收/发送串行口。

方式 1 的发送过程：串行通信方式发送时，数据由串行发送端 TxD 输出，当主机执行一条写“SBUF”的指令就启动串行通信的发送，写“SBUF”信号还把“1”装入发送移位寄存器的

第 9 位，并通知 TX（串行口内部发送控制单元）开始发送，然后按设定的波特率依次从 TxD 上输出起始位、数据位、停止位。

发送时，移位寄存器将数据不断右移送 TxD 端口发送，在数据的左边不断移入“0”作补充，当数据的最高位移到移位寄存器的输出位置时，紧跟其后的是第 9 位“1”，在它的左边各位全为“0”，这个状态条件使 TX 控制单元作最后一次移位输出，然后使允许发送信号“SEND”失效，完成一帧信息的发送，并置位中断请求位 TI，即 TI=1，向主机请求中断处理。

方式 1 的接收过程：当软件置位接收允许标志位 REN，即 REN=1 时，接收器便以选定波特率的 16 分频的速率采样串行接收端口 RxD，当检测到 RxD 端口从“1”到“0”的负跳变时就启动接收器准备接收数据，并立即复位 16 分频计数器，将 1FFH 值装入移位寄存器，复位 16 分频计数器是使它与输入位时间同步。

16 分频计数器的 16 个状态是将 1 波特率（每位接收时间）均分为 16 等分，在每位时间的 7、8、9 状态由检测器对 RxD 端口进行采样，所接收的值是这次采样值经“三中取二”的值，即 3 次采样至少 2 次相同的值，以此消除干扰影响，提高可靠性。在起始位，如果接收到的值不为“0”（低电平），则起始位无效，复位接收电路，并重新检测“1”→“0”的跳变。如果接收到的起始位有效，则将它输入移位寄存器，并接收本帧的其余信息。

接收的数据从接收移位寄存器的右边移入，已装入的 1FFH 向左边移出，当起始位的“0”移到移位寄存器的最左边时，使 RX（串行口内部接收控制器）作最后一次移位，完成一帧的接收。若同时满足以下两个条件：

- RI=0；
- SM2=0 或接收到的停止位为 1。

则接收到的数据有效，实现装入 SBUF，停止位进入 RB8，置位 RI，即 RI=1，向主机请求中断。若上述两条件不能同时满足，则接收到的数据作废并丢失，无论条件满足与否，接收器重又检测 RxD 端口上的“1”→“0”的跳变，继续下一帧的接收。接收有效，在响应中断后，必须由软件清 RI，即 RI=0。通常情况下，串行通信工作于模式 1 时，SM2 设置为“0”。

移位器采用移位寄存器和 SBUF 双缓冲结构，以避免在接收后一帧数据之前，CPU 尚未将前一帧数据取走，造成两帧数据重叠。采用双缓冲结构后，前、后两帧数据进入 SBUF 的时间间隔至少有 10 个波特率周期。在后一帧数据送入 SBUF 之前，CPU 有足够的时间将前一帧数据取走。

### （3）工作方式 2 和工作方式 3

SM0 SM1=10 时，串行口工作在方式 2；SM0 SM1=11 时，串行口工作在方式 3。方式 2 和方式 3 的工作过程是完全一样的，唯一的区别就是波特率机制不同，方式 2 的波特率固定为  $f_{osc} \times 2^{SMOD} / 64$ ，不可改变；而方式 3 的波特率为  $(2^{SMOD} / 32) \times T1$  的溢出率，波特率可改变。选择不同的初值或晶振频率，即可获得不同的定时/计数溢出率，从而得到不同的波特率，故方式 3 较常用。

串行口方式 2 和方式 3 为 9 位数据异步通信 UART 模式，其一帧的信息由 11 位组成：1 位起始位，8 位数据位（低位在先），1 位可编程位（第 9 位数据）和 1 位停止位。发送时可编程位（第 9 位数据）由 SCON 中的 TB8 提供，可软件设置为 1 或 0，或者可将 PSW 中的奇/偶校验位 P 值装入 TB8（TB8 既可作为多机通信中的地址数据标志位，又可作为数据的奇偶校验位）。接收时第 9 位数据装入 SCON 的 RB8。TxD 为发送端口，RxD 为接收端口，以全双工模式进行接收/发送。

与方式 1 相比，除发送时由 TB8 提供给移位寄存器第 9 数据位不同外，其余功能结构均基本相同，其接收、发送操作过程及时序也基本相同。

当接收器接收完一帧信息后必须同时满足下列条件：

- RI=0；



● SM2=0 或者 SM2=1，并且接收到的第 9 数据位 RB8=1。

当上述两条件同时满足时，才将接收到的移位寄存器的数据装入 SBUF 和 RB8 中，并置位 RI=1，向主机请求中断处理。如果上述条件有一个不满足，则刚接收到移位寄存器中的数据无效而丢失，也不置位 RI。无论上述条件满足与否，接收器又重新开始检测 RxD 输入端口的跳变信息，接收下一帧的输入信息。

接收到的停止位与 SBUF、RB8 和 RI 无关。

通过软件对 SCON 中的 SM2、TB8 的设置以及通信协议的约定，为多机通信提供了方便。

奇偶校验是检验串行通信双方传输的数据正确与否的一项措施，常用的有奇校验和偶校验。奇校验规定 8 位有效数据连同 1 位附加位中，二进制数“1”的个数为奇数；偶校验规定 8 位有效数据连同 1 位附加位中，二进制数“1”的个数为偶数。

将 PSW 中的奇/偶校验位 P 值装入 TB8，采用方式 2 或方式 3 通信，是单片机串行通信常用的最简单的数据通信容错方法。

#### 4. 串行通信的波特率设置

单片机串行口的波特率随所选工作方式的不同而异，在串行通信中，收发双方的波特率要求保持一致，其误差一般不应超过 5%，否则无法完成正常通信。

方式 0 的波特率是固定的，其值为系统晶振频率的 1/12，即  $f_{osc}/12$ 。

方式 2 的波特率也是固定的，由 PCON 的选择位 SMOD 来决定，计算公式为

$$\text{波特率} = (2^{\text{SMOD}}/64) \times f_{osc}$$

有两种不同的值：SMOD=1 时，波特率为  $f_{osc}/32$ ；当 SMOD=0 时，波特率为  $f_{osc}/64$ 。

方式 1 和方式 3 的波特率是可变的，其值由定时器 1 的溢出率控制，计算公式为

$$\text{波特率} = (2^{\text{SMOD}}/32) \times \text{定时器 T1 的溢出率}$$

定时器 T1 的溢出率与 T1 的工作方式有关。

最典型的应用方式是 T1 设置成 8 位自动重装方式（即定时工作方式 2），此时 T1 的溢出率计算公式为

$$\begin{aligned} \text{T1 的溢出率} &= \text{T1 计数率} / \text{产生溢出所需的时间} \\ &= (f_{osc}/12) / (256 - (\text{TH1})) \end{aligned}$$

此时波特率计算公式为

$$\text{波特率} = (2^{\text{SMOD}}/32) \times (f_{osc}/12) / (256 - (\text{TH1}))$$

MCS-51 单片机 T1 的方式 2 为 8 位自动重装的定时/计数器模式，为串行口的波特率发生器提供一个精确的时间基准。

80C52 单片机还可使用定时器 T2 作为波特率发生器。

当时钟频率选用 11.0592MHz 时，容易获得标准的波特率，所以需要串行通信功能的单片机应用系统通常都选用该晶振频率。定时器 T1 在工作方式 2 时的常用波特率及初值见表 8.4。

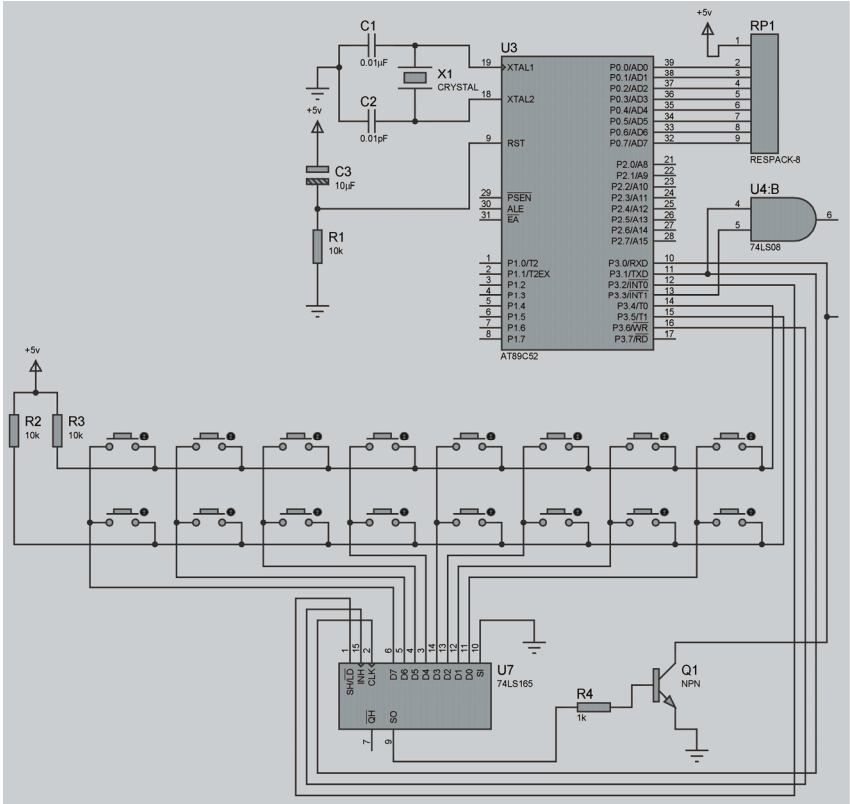
表 8.4 定时器 T1 在方式 2 时的常用波特率及初值

常用波特率 (bps)	$f_{osc}$ (MHz)	SMOD	TH1 初值
19200	11.0592	1	FDH
9600	11.0592	0	FDH
4800	11.0592	0	FAH
2400	11.0592	0	F4H
1200	11.0592	0	E8H

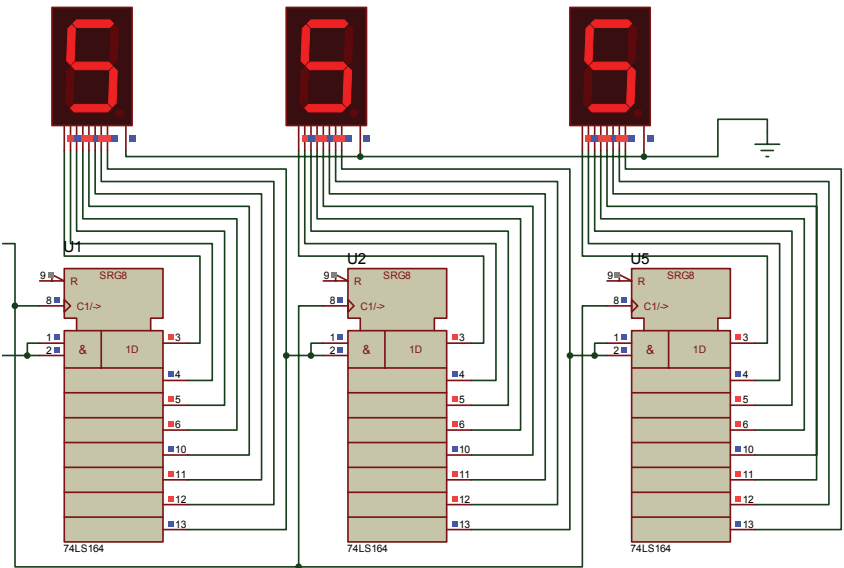
### 8.3 80C51 单片机的串行口应用

1. 利用串口的并行 I/O 扩展

【例 8-3】应用串行口控制的键盘和显示的硬件电路图如图 8.8 所示，试编写程序。



(a)



(b)

图 8.8 串行口控制的键盘和显示的硬件电路图

解 串行口控制的键盘和显示的程序流程图如图 8.9 所示, 图 8.8 为在 Proteus 上的仿真原理图。

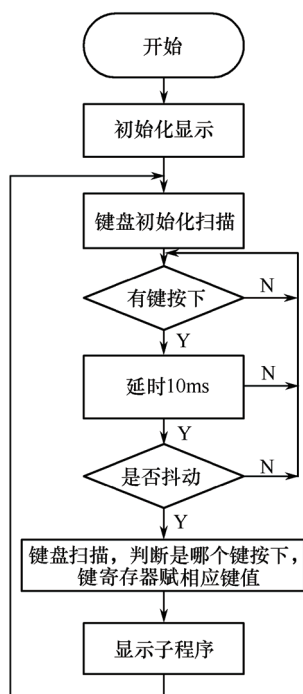


图 8.9 串行口控制的键盘和显示的程序流程图

图 8.8 中, 74LS165 为并入串出移位寄存器, 16 位按键分两次 ( $P3.4=0$  或  $P3.5=0$ ) 扫描到  $D0\sim D7$ , 再经并串转换由  $SO$  脚串行移位输出到单片机的串行输入口  $RxD$ , 单片机的  $TxD$  为其提供移位时钟信号, 串行口设置为方式 0, 即同步移位输入, 相当于扩展了 8 位输入。晶体管  $Q1$  起反向和隔离作用。

74LS164 为串入并出的移位寄存器, 其拉电流可直接驱动共阳极的 7 段 LED 数码管, 欲显示的数据经单片机的  $RxD$  串行输出到 74LS164 的串行移位输入端 1&2,  $TxD$  为其  $CLK$  端提供移位时钟脉冲信号, 一次完成 8 位移位输出; 74LS164 还可通过前级的输出  $Q7$  (13 脚) 和后级移位输入 1&2 连接实现级联, 图 8.8 (b) 为三级相连的原理图。

图中 74LS08 与门作为开关使用, 单片机读键时可令  $P3.3=0$ , 关断 74LS164 的时钟信号, 以不影响 LED 的显示。

图 8.9 所示为程序流程图, 汇编参考源程序在“程序附件”中, 请登录华信教育资源网

[www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn) 下载。

## 2. 双机通信

双机通信即两个单片机之间的点对点通信, 通信双方应设置相同的波特率, 并按照约定俗成的数据收发格式交换数据, 这种约定俗成的数据收发格式即通信协议, 可以自行设计通信协议, 并也可遵循某种标准的协议编写通信程序。

【例 8-4】由 MCS-51 构成的双机通信系统如图 8.10 所示。1 号机将发送缓冲器 (由  $TBUF0$  开始) 的 16 个无符号随机数通过串行口发送到 2 号机, 2 号机将接收 1 号机发送过来的数据, 校验正确后存放在接收缓冲器中 (由  $RBUF0$  开始的 16 个 RAM 字节)。设单片机的晶振频率为 11.0592MHz, 波特率为 2400bps, 采用串口方式 1, 试编写程序。

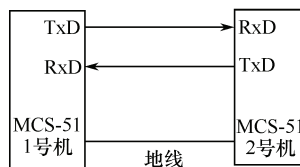


图 8.10 MCS-51 构成的双机通信系统

解 现自行设计通信协议如下: 1 号机作为数据发送方, 2 号机作为数据接收方, 发送数据时, 1 号机先发送联络信号“0E1H”提示 2 号机进行接收, 2 号机收到后回送应答信号“0E2H”, 表示可以接收。当 1 号机收到应答信号“0E2H”后, 开始连续发送 16 字节的发送数据, 发送完 16 字节数据后, 再发送 1 字节的校验数据, 校验数据为所发 16 字节数据的累加和。2 号机接收数据并暂存数据暂存区, 接收完 17 字节数据后检验第 17 字节数据是否为前 16 字节数据的累加和, 如正确则将暂存区数据移到接收缓冲器中 (由  $RBUF0$  开始的 16 个 RAM 字节), 同时回送确认信号“00H”; 否则即为通信错误, 丢弃接收的数据, 并回送“0FFH”, 请求重发。

1 号机接收到“00H”后,可确定 2 号机已正确接收,发送任务完成,结束发送;若收到“0FFH”,则重新发送数据一次,直到数据被正确接收。双方约定采用串行口方式 1 进行通信,一帧信息由 1 个起始位、8 个数据位、1 个停止位共 10 位组成,波特率为 2400bps, T1 工作在定时器方式 2, 作为串行通信的波特率发生器,单片机系统晶振频率选用 11.0592MHz, 设置 TH1=TL1=0F4H, PCON 寄存器的 SMOD 位为 0。程序流程图如图 8.11 所示。

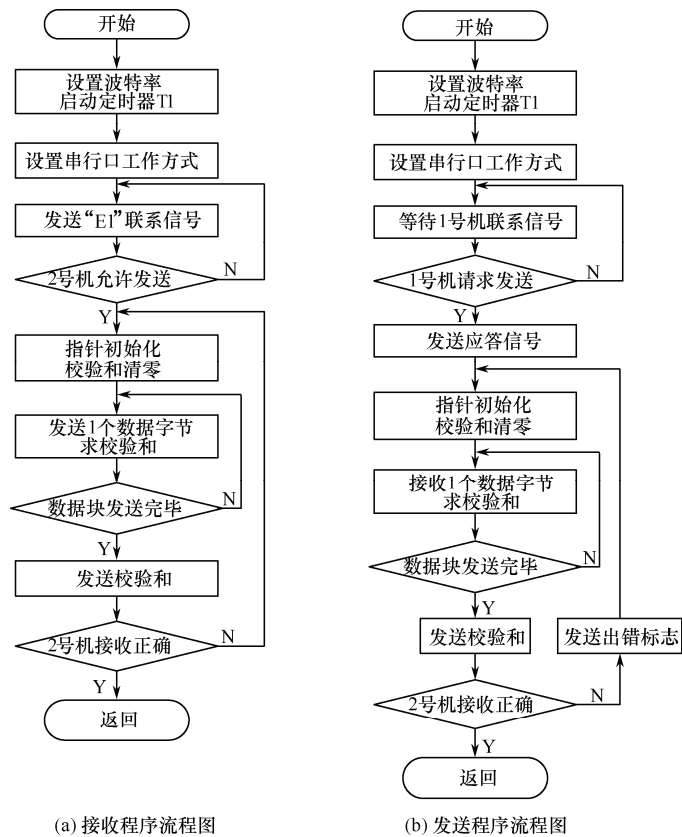


图 8.11 由 MCS-51 构成的双机通信程序流程图

程序如下：

(1) 发送子程序清单

```
;数据发送子程序
ORG 0100H
CHECKDAT EQU 39H
TBUF0 EQU 40H
TXNUMBER EQU 16
TXDATA: ACALL init_uart ;初始化串口
CLR TI
CLR RI
TXLP1: MOV SBUF, #0E1H ;发送联络信号
JNB TI, $ ;等待一帧发送完毕
CLR TI ;允许再发送
JNB RI, $ ;等待 2 号机的应答信号
CLR RI ;允许再接收
```

```

MOV A, SBUF ;读应答后至 A
XRL A, #0E2H
JNZ TXLP1 ;接收端未准备好转
TXLP2: MOV R0, #TBUF0 ;接收端准备好,读数据块地址指针初值
MOV R7, #TXNUMBER ;数据块长度初值
MOV CHECKDAT, #00H ;清校验和单元
TXLP3: MOV A, @R0
MOV SBUF, A ;发送
XRL CHECKDAT, A ;求校验和
INC R0 ;地址单元加 1
JNB TI, $ ;等待发送完
CLR TI ;清发送标志位
DJNZ R7, TXLP3 ;16 个字节是否发送完毕
MOV SBUF, CHECKDAT ;发送校验和
JNB TI, $ ;等待发送完
CLR RI
CLR TI ;清发送标志
JNB RI, $ ;等待应答信号
CLR RI
MOV A, SBUF ;读应答至 A
JNZ TXLP2 ;应答“错误”,转重新发送
RET ;应答“正确”,返回
bd2400bps equ 0F4H
init_uart: CLR EA
MOV TMOD, #20H ;定时器 1 工作于方式 2,8 位自动重装
MOV TH1, #bd2400bps ;定时器 1 赋初值,bd2400bps
MOV TL1, #bd2400bps
MOV PCON, #00H ;波特率不加倍
SETB TR1 ;启动定时器 T1
MOV SCON, #50H ;串行口工作于方式 1,允许接收
RET

```

## (2) 接收程序清单(C51 源程序)

```

;数据接收函数
#include "reg51.h"
typedef unsigned char BYTE;
typedef unsigned int WORD;
#define bd2400bps 0xF4 //波特率设置
BYTE data CHECKDAT_at_0x39;
BYTE data RBUF[17]_at_0x40;
char i;
void InitUart();
//
void rxdata()

```

```

{
    InitUart();      //初始化串口
    TI=0;
    RI=0;
    if(SBUF!=0xE1)   //判断是否为联络信号
    {
        while(!RI); //等待接收
        RI=0;
    }
    SBUF=0xE2;       //是联络信号,应答
    while(!TI){}
    TI=0;
    CHECKDAT=0X00;
    for(i=0;i<=16;i++)
    {
        while(!RI); //等待接收
        RI=0;
        RBUF[i]=SBUF;
        CHECKDAT^=RBUF[i];
    }
    if(CHECKDAT==0)
        SBUF=0X00;
    else
        SBUF=0XFF;
    while(!TI){}
    TI=0;
}

/*-----
初始化串口
-----*/

void InitUart()
{
    EA=0x00;   //关中断
    TMOD=0x20; //定时器 1 工作于方式 2,8 位自动重装
    TH1=bd2400bps; //定时器 1 赋初值
    TL1=bd2400bps;
    PCON=0x00; //波特率不加倍
    SCON=0x50; //串行口工作于方式 1,允许接收
    TR1=1;     //启动定时器 T1
}

```

### 3. 多机通信

单片机多机通信是指多个单片机系统片之间的相互通信，主要有无中心多机通信和有中心

(主从式)多机通信两大类,这里只介绍有中心(主从式)多机通信。主从式多机通信是多机通信中应用最广泛也是最简单的一种。MCS-51 单片机串行口的工作方式 2 或工作方式 3 都可支持多机通信。

主从式多机通信是在通信系统的多个单片机中,有一个是主机,其余都是从机。主机可以向所有从机或指定的从机发送数据,也可接收所有从机发出的数据;而从机只能向主机发送数据,也只能接收主机发送的数据,各从机之间不可以直接通信,各从机之间的通信必须通过主机进行。

图 8.12 是由 MCS-51 组成的主从式多机通信系统示意图。

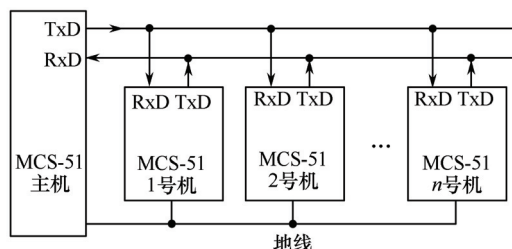


图 8.12 由 MCS-51 构成的主从式多机通信系统

在主从式多机通信系统中,主机和从机只能工作在方式 2 或方式 3。这两种工作方式都是 9 位 UART 方式,其中的第 9 位(即 TB8)作为地址/数据标志位。当主机发出的是地址信息(用于选通与主机通信的从机)时,将串行发送的第 9 位数据 TB8 置为 1;当主机发出的是数据信息时,将串行发送的第 9 位 TB8 清 0。

单片机 SCON 寄存器的 SM2 为多机通信控制位,SM2 置位为 1 时,单片机串行口只对接收的地址信息(即 9 位数据且第 9 位为 1)响应(置位 RI 并申请串行中断),而对接收的数据信息,因第 9 位加 0(事先约定发送数据时第 9 位为 0),而被硬件屏蔽掉,不影响 RI 的值;SM2 清 0 时,单片机串行口既可接收地址信息也可接收数据信息。

通常,主从式通信系统中主机需接收所有信息(包括所有从机地址和数据),所以主机的 SM2 应当清 0;而从机只需接收来自主机(以地址区分)的信息,所以应使 SM2=1,当接收到主机发出的地址帧信息时,将主机送出的地址与本机地址进行对比,相同时,即认为主机要与自己通信,立即在软件上对 SM2 清 0,以允许串行口接收主机随后送出的数据信息,并把本机地址发回主机作为应答;而与主机送出的地址不相同的从机 SM2 仍保持为 1,对主机随后送出的数据信息不做响应。

主从式多机通信过程如下:

- ① 主机 SM2 清 0,可以接收任何信息;所有从机的 SM2 置 1,只接收主机发来的地址。
- ② 主机根据需要通信的从机地址发出一帧地址信息,即 8 位从机地址数据,且第 9 位为 1,然后进入接收状态,接收从机应答信号(可通过通信协议制定)。
- ③ 所有从机处于接收状态,接收到主机发出的地址帧后,申请中断,在中断服务程序中将该地址与本机地址相比较,与本机地址相符时,表示主机要与本机通信,本机被选中。被选中的从机向主机发送应答信号,然后 SM2 清 0,做好接收后续数据(第 9 位为 0)的准备;未被选中的主机 SM2 的状态不变,只可接收地址信息,对主机随后发送的数据信息不响应。
- ④ 主机收到从机的应答信号后,给被寻址的从机发送数据信息(数据帧的第 9 位为 0)。
- ⑤ 根据通信协议的规定,从机正确接收所需的数据后,发送应答信号给主机,同时将 SM1 置 1,主机与从机的本次通信过程结束,进入只接收地址信息的状态。

#### 4. 单片机与 PC 通信

单片机与 PC 的通信，一般采用 RS-232 或 RS-485 协议，RS-232 协议为点对点通信而设计，其传送距离最大约为 15m；RS-485 协议适用于总线制通信，其传送距离可达 1200m。本节主要介绍 RS-232 协议。

RS-232 标准的全称是 EIA-RS-232C 标准，是美国电子工业协会 EIA（Electronic Industry Association）制定的一种串行物理接口标准。RS-232 标准定义了电压、阻抗等，但不对软件协议给予定义，RS-232C 是 PC 与通信工业中应用最广泛的一种串行接口。

RS-232 采取不平衡传输方式，在 TxD 和 RxD 上：逻辑 1(MARK)=-3~-15V，逻辑 0(SPACE)=+3~+15V，在发送数据时，发送端驱动器输出正电平在+5~+15V，负电平在-5~-15V。该协议传送距离短，但成本低廉，适合本地设备之间的短距离通信。

该标准规定采用一个 25 脚的 DB-25 连接器，对连接器的每个引脚的信号内容加以规定，还对各种信号的电平加以规定。实际工程中还可简化为只需 9 个脚的 DB-9 接口。

DB-25 型连接器的外形及信号线分配如图 8.13（a）所示。25 芯 RS-232C 接口具有 20mA 电流环接口功能，用 9，11，18，25 针来实现。

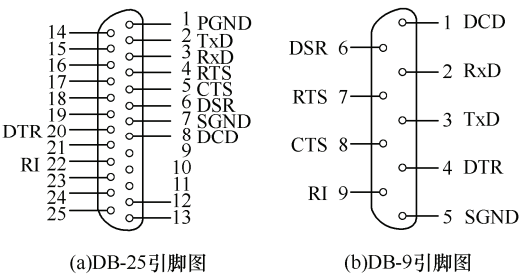


图 8.13 连接器引脚图

DB-25 的常用引脚功能如表 8.5 所示。

表 8.5 DB-25 连接器引脚功能

引脚	功能	引脚	功能
1 (PGND)	地线	6 (DSR)	数据装置准备好
2 (TxD)	发送数据	7 (SGND)	信号地
3 (RxD)	接收数据	8 (DCD)	接收线信号检出
4 (RTS)	请求发送	20 (DTR)	数据终端准备好
5 (CTS)	允许发送	22 (RI)	振铃指示

DB-9 连接器只提供异步通信的 9 个信号，其外形及信号线分配如图 8.13（b）所示。DB-25 与 DB-9 型连接器的引脚分配信号完全不同。

DB-9 连接器的引脚功能如表 8.6 所示。

表 8.6 DB-9 连接器的引脚功能

引脚	功能	引脚	功能
1 (DCD)	接收线信号检出	6 (DSR)	数据装置准备好
2 (RxD)	接收数据	7 (RTS)	请求发送
3 (TxD)	发送数据	8 (CTS)	允许发送
4 (DTR)	数据终端准备好	9 (RI)	振铃指示
5 (SGND)	信号地		



RS-232C 采用负逻辑，与单片机系统常用的 TTL 电平不匹配，个人计算机的 RS-232C 接口与 TTL 器件连接时，必须在 RS-232C 与 TTL 电路之间进行电平和逻辑关系的变换。这类转化芯片很多，这里介绍常用的 MAX232 电平转换芯片。

MAX232 芯片是 Maxim 公司生产的低功耗、单电源、双 RS-232 发送/接收器，可实现 TTL 到 EIA 的双向电平转换。其引脚排列与内部结构如图 8.14 所示。

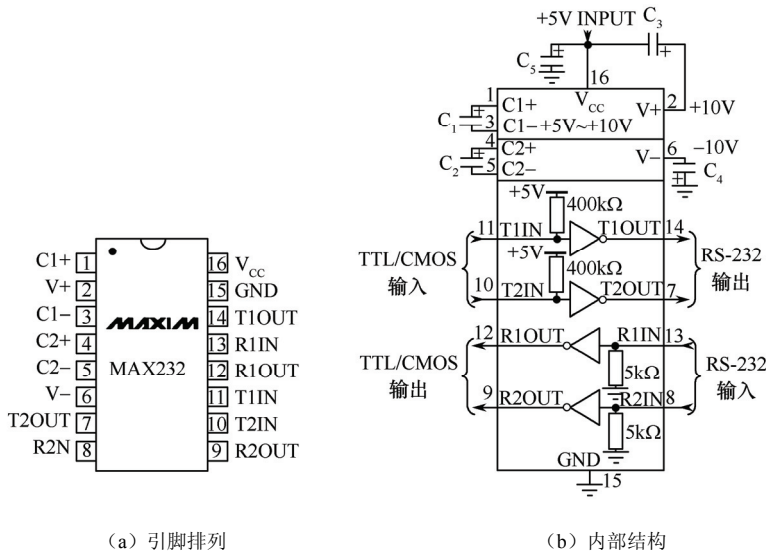


图 8.14 MAX232 引脚排列与内部功能结构图

RS-232C 与单片机系统的接口电路如图 8.15 所示。MAX232 外围的 4 个电解电容  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ , 是内部电源转换所需电容，其取值均为  $1\mu\text{F}/25\text{V}$ ,  $C_5$  为  $0.1\mu\text{F}$  的去耦电容。MAX232 有两对独立的 TTL/CMOS 电平转换接口。

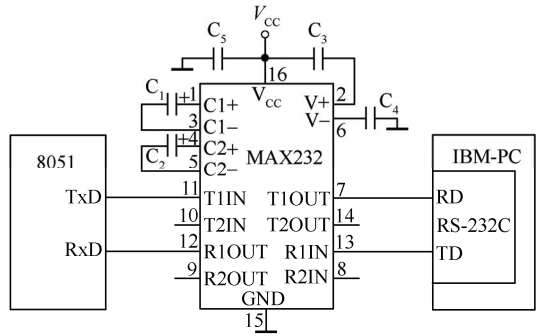


图 8.15 RS-232C 与单片机系统接口电路图

图 8.15 中只使用了一对转接口，T1IN、R1OUT 引脚分别与 MCS-51 的串行发送引脚 TxD、RxD 相连接。T1OUT、R1IN 分别与 PC 的接收端 RD、TD 相连接。

一台 PC 既可以与一个 8051 单片机应用系统通信，也可以与多个 8051 单片机应用系统通信。单片机与 PC 通信的硬件连接电路如图 8.16 所示。

以下程序段可实现单片机与 PC 连接的串行收发测试，单片机的 C 语言编程见例 8-5。

PC 端的程序可以用汇编语言编写，也可以用高级语言编写，但在实际应用中成熟串口测试程序比较方便，如串口调试助手、串口调试精灵（见图 8.17）等，界面简单，使用方便。

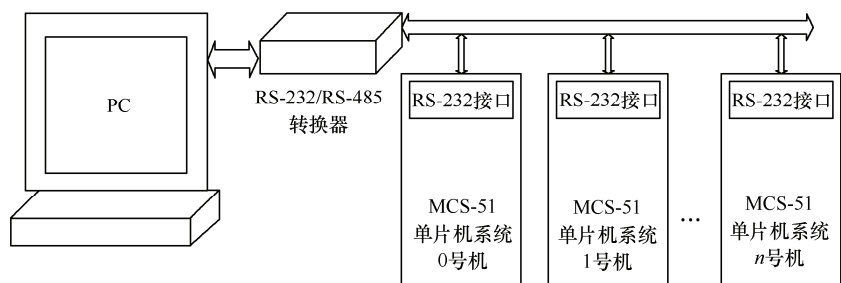


图 8.16 单片机与 PC 的连接示意图

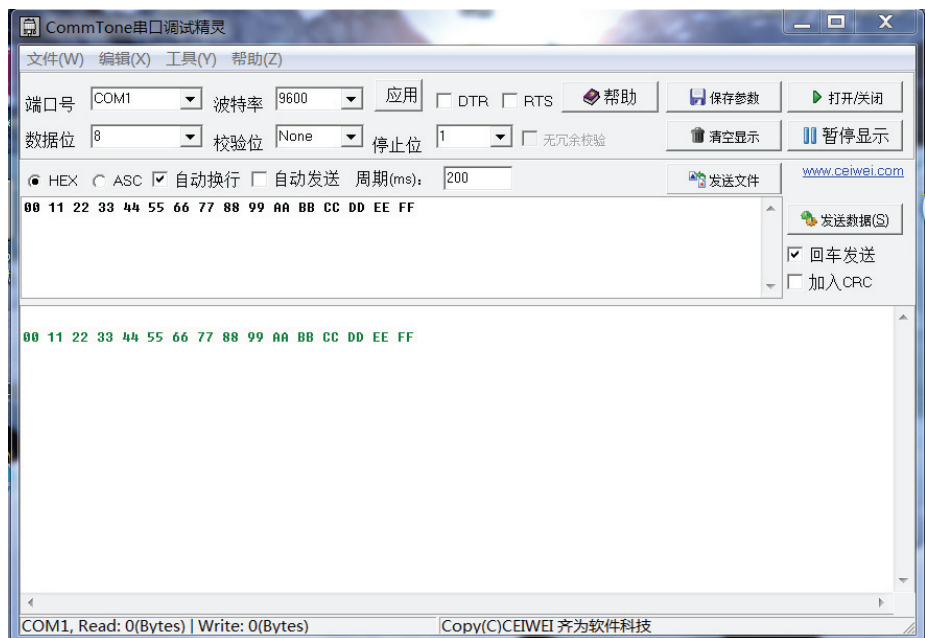


图 8.17 串口调试精灵的程序界面

单片机程序如下：

```

ORG 0100H
MAIN: MOV TMOD, #20H           ;11.0592MHz,9600bps,方式 2
      MOV TH1, #0FDH
      MOV TL1, #0FDH
      MOV PCON, #00H
      SETB TR1
      MOV SCON, #058H         ;方式 1
LOOP: JNB RI, $                ;等待接收数据
      CLR RI
      MOV A, SBUF
      MOV SBUF, A             ;立即发送接收到的数据
      JNB TI, $
      CLR TI
      SJMP LOOP
END

```

**【例 8-5】**利用单片机串行口发送/接收程序，每接收到字节即刻发送出去，并利用串口调试精灵将字符回显在屏幕上，用 C51 编程实现。

**解** C51 串口接收发送程序：

```
/******  
* Title  串口接收发送程序*  
*****/  
  
#include <reg51.h>  
#define uchar unsigned char  
void main()  
{  
    uchar a;  
    TMOD=0x20; //定时器 1 的工作方式为 2,即自动重设初值的 8 位定时/计数器  
    TL1=0xfd; //采用 11.0592MHz 的晶振,波特率 9600bps  
    TH1=0xfd;  
    SCON=0x58; //串行口的工作方式 1  
    PCON=0x00;  
    TR1=1; //启动定时器 T1  
    while(1)  
    {  
        while(RI==0); //串口接收  
        RI=0;  
        a=SBUF;  
        SBUF=a;  
        while(TI==0);  
        TI=0;  
    }  
}
```

将该程序编译后写入单片机，并连好串口线，通过串口调试助手向单片机发送数据或字符，则发送的内容被原样发送回来。

## 8.4 单片机的串行总线扩展

串行数据总线除了 RS-232/422/485 总线外，还有 I<sup>2</sup>C 总线、SPI 总线、CAN 总线、USB 总线、Microwire 总线、1-Wire 总线等。串行接口总线具有线路简单、硬件开销少、成本低廉、便于总线扩展和维护等优点。现在越来越多的芯片采用串行数据总线接口。

串行数据接口根据数据定时的不同，可以将它们分为两大类：异步串行接口和同步串行接口。在异步串行接口中，数据可以顺次出现在数据流中，数据间的相对延迟没有专门的时钟来控制；同步串行接口中，数据流中顺次出现的数据由一个主数据时钟来管理，并以一定的时间间隔出现。

本节主要介绍 I<sup>2</sup>C 总线，并对 SPI 总线和 CAN 总线进行简单介绍。

### 8.4.1 I<sup>2</sup>C 总线接口及其扩展

I<sup>2</sup>C 总线（Inter Integrate Circuit BUS），又叫 IIC 总线，是 Philips 公司设计的一种 IC 芯片

之间的全双工同步串行总线技术。 $I^2C$  总线上扩展的外围器件及外设接口通过总线寻址，是具备总线仲裁和高低速设备同步等功能的高性能多主机总线。

### 1. 串行 $I^2C$ 总线工作原理

$I^2C$  总线采用两条线实现数据通信，具有  $I^2C$  总线接口的 MCS-51 单片机如 P87LPCXXX/C8051FXX 等，可通过自身专用接口和  $I^2C$  总线连接；没有  $I^2C$  总线接口的 MCS-51 单片机可以通过编写软件，在 I/O 端口位模拟通信电平时序和  $I^2C$  总线连接。

由于  $I^2C$  总线连线少、时序模拟方便、寻址方式容易等特点，近年来在单片机应用系统中得到了快速的发展，各种类型的外围器件，如存储器、A/D、D/A、LCD 驱动器、逻辑门阵列电路等，都有  $I^2C$  总线型芯片的应用。

#### (1) $I^2C$ 总线结构

$I^2C$  串行总线由两条总线构成，一条是时钟线 SCL，另一条是数据线 SDA。数据线 SDA 上传送数据，数据传送以帧为单位，每帧含一个字节数据和一位应答信号位，数据字节的传送次序为先高位后低位；时钟线 SCL 提供数据传送的位同步信号。所有的  $I^2C$  器件都挂接在这两条总线上，形成  $I^2C$  通信系统。 $I^2C$  器件分为主器件和从机器件，主器件负责数据传送的控制，从机器件按照主器件的控制时序进行操作。

$I^2C$  总线上所有设备的 SDA，SCL 引脚必须外接上拉电阻，上拉电阻  $R_p$  取值一般在  $5 \sim 10k\Omega$ ， $I^2C$  总线器件的接口结构如图 8.18 所示。

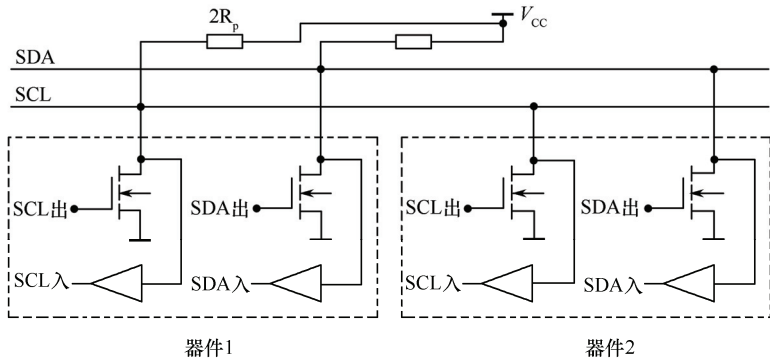


图 8.18  $I^2C$  总线器件的接口结构

$I^2C$  总线空闲时为高电平状态，任一芯片输出低电平，都会使总线信号变低。挂接总线上器件的数量（总线的负载能力）受总线电容量  $400pF$  上限的限制。总线在标准模式下的数据传输速率为  $100kbps$ ，快速模式下为  $400kbps$ ，高速模式下为  $3.4Mbps$ 。

$I^2C$  芯片地址的识别采用了全新的方式——用“引脚电平、软件寻址”实现。系统中所有的器件均有  $I^2C$  总线接口，所有器件通过两根线 SDA（串行数据线）和 SCL（串行时钟线）连接到  $I^2C$  总线上，并通过寻址识别。 $I^2C$  总线中的器件既可以作为主控器，也可以作为被控器，系统中每个器件均具有唯一的地址，各器件之间通过寻址确定数据交换方。任何时刻总线只能有一个主控制器，数据的传输只能在主、从器件间进行。

“引脚电平”是指芯片有 3 个地址引脚，可接固定的“0”、“1”电平而设置成不同的引脚地址。软件寻址指令的编码内容包括“器件标识”、“引脚电平”和“方向位”三部分，见表 8.7。

“器件标识”（D7~D4）用来区别不同种类的  $I^2C$  芯片，如  $E^2PROM$ 、A/D 等，厂家在制作时已将数据固化在芯片中；“引脚电平”（D3~D1）是使用者编程时对应的该芯片的 3 个引脚连接的固定电平状态。若寻址指令编码数据和某  $I^2C$  芯片的“器件标识”和“引脚电平”相一致，

则该芯片被选中。“方向位”(D0)表示对该芯片进行的操作,“1”表示读操作,“0”表示写操作。 $I^2C$  芯片的这种特性,使得它的“片选”既不必像并行芯片那样通过数据线“译码”,也不必像 SPI 芯片那样用专门的 I/O 口的位来选择,只要在 SDA 线上传送寻址指令就可以了。

表 8.7  $I^2C$  芯片寻址指令编码格式

	器件标识				引脚电平			方向位
位序	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
寻址编码	DA3	DA2	DA1	DA0	A2	A1	A0	1=读, 0=写

常用 AT24C 系列存储器器件地址表见表 8.8。

表 8.8 AT24C 系列存储器器件地址表

器件型号	字节容量	寻址字节							内部地址字节数	页面写字字节数	最多可挂器件数	
		固定标识			片 选			R/ $\overline{W}$				
AT24C01A	128B	1	0	1	0	A2	A1	A0	1/0	1	8	8
AT24C02	256B					A2	A1	A0	1/0		8	8
AT24C04	512B					A2	A1	P0	1/0		16	4
AT24C08A	1KB					A2	P1	P0	1/0		16	2
AT24C16A	2KB					P2	P1	P0	1/0		16	1
AT24C32A	4KB					A2	A1	A0	1/0	2	32	8
AT24C64A	8KB					A2	A1	A0	1/0		32	8
AT24C128B	16KB					A2	A1	A0	1/0		64	8
AT24C256B	32KB					A2	A1	A0	1/0		64	8
AT24C512B	64KB					A2	A1	A0	1/0		128	8

(2)  $I^2C$  总线的数据传输协议及方式

①  $I^2C$  总线的技术条件规定,在时钟线 SCL 为高电平期间,数据线 SDA 上的数据状态必须保持稳定。只有在时钟线 SCL 为低电平期间,SDA 线上的数据才允许发生变化。

② 起停控制和应答信号的规定。 $I^2C$  总线在传送数据过程中共有 3 种类型信号:开始信号、停止信号和应答信号。数据传送的起始信号和停止信号时序规定如图 8.19 所示。

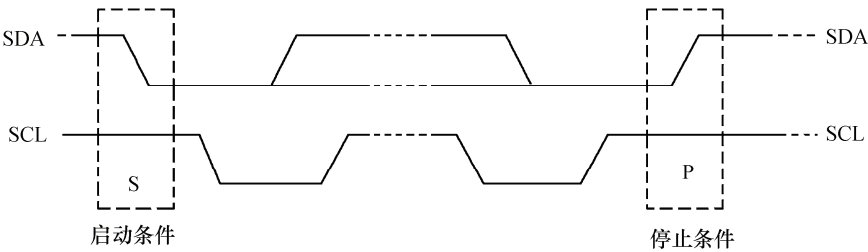


图 8.19  $I^2C$  总线系统的启停条件规定

起始信号(S)——在 SCL 为高期间,SDA 出现下降沿,表明数据传送开始。出现开始信号以后,总线被认为“忙”。

停止信号(P)——在 SCL 为高期间,SDA 出现上升沿,表明数据传送停止。停止信号过后,总线被认为“空闲”。

需要注意的是, $I^2C$  总线的启动(S)和停止(P)信号,都是由主机发出的。连接在总线上的芯片,若内部具有  $I^2C$  总线接口,则能够及时检测到 S 和 P 信号;对于内部没有  $I^2C$  总线接口的单片机(设处于从机状态),则需要在一个 SCL 时钟周期内至少 2 次采样 SDA 线来读

取 S 和 P 信号。

应答信号 (A)。应答信号是接收方接收到一字节数据后, 给予发送方的回应, 表示接收正常。 $I^2C$  总线上传送一字节的数据后, 发送方在第 9 个 SCL 脉冲高电平期间, 释放 SDA 线 (高电平), 接收方使该线变为低电平, 作为应答信号。发送方在收到应答信号后, 才能继续进行后续的数据发送。应答时序如图 8.20 所示。

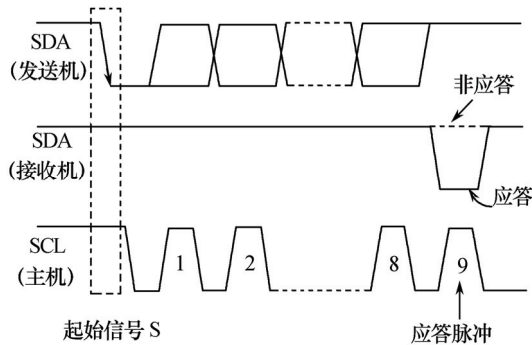


图 8.20 应答时序

非应答信号 ( $\bar{A}$ )。如果接收方未能收到数据字节, 在第 9 个 SCL 脉冲高电平期间, 它将在数据线 SDA 上发出“非应答”信号, 即高电平。发送方在收到该信号后, 发出停止信号或新的起始信号。当主机接收来自从机的数据时, 在接收最后一个数据帧后, 需发出非应答信号, 使从机释放 SDA 线, 以便随后主机发出停止信号。

### (3) $I^2C$ 总线数据传送形式

数据传送以数据帧为单位, 每帧含 1 字节即 8 位数据和 1 个应答信号位, 共 9 位。帧内字节的传送顺序是先最高位 (MSB), 依次到最低位 (LSB), 传送数据帧的数量没有限制, 直到停止信号为止。

$I^2C$  总线的传送格式为主从式, 对系统中的某一器件来说有 4 种工作方式: 主发送方式、从发送方式、主接收方式、从接收方式。 $I^2C$  协议规定, 数据传送的基本步骤是: 主机发出起始信号后, 先发出从机的 8 位地址信息, 该信息前 7 位是从机芯片的内部地址, 第 8 位是读/写信息 ( $R/\bar{W}$ ), “1”为读, “0”为写; 然后进行和从机之间的读/写数据传送; 最后由主机发出停止信号, 结束数据传送。数据传送时序格式如图 8.21 所示。

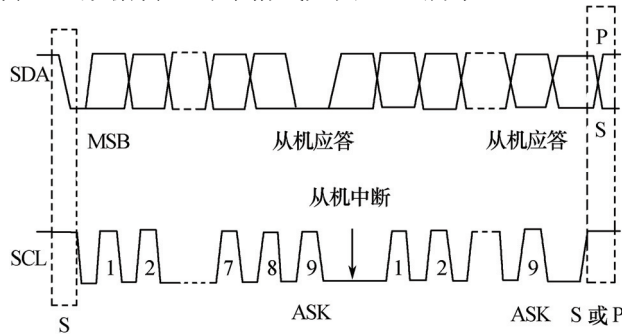


图 8.21 数据传送时序

## 2. MCS-51 单片机的 $I^2C$ 总线接口模拟

$I^2C$  总线的起始、终止、应答等信号有严格的时序要求, 如图 8.22 所示, 设主机采用 MCS-51 单片机, 晶振频率 6MHz, 则几个典型信号的模拟子程序如下, 其对应的时序如图 8.23

所示。

### (1) 起始信号

```
STA: SETB SDA
      SETB SCL
      NOP
      NOP
      CLR SDA
      NOP
      NOP
      CLR SCL
      RET
```

### (2) 终止信号

```
STP: CLR SDA
      SETB SCL
      NOP
      NOP
      SETB SDA
      NOP
      NOP
      CLR SDA
      CLR SCL
      RET
```

### (3) 发送应答信号“0”

```
ASK: CLR SDA
      SETB SCL
      NOP
      NOP
      CLR SCL
      SETB SDA
      RET
```

### (4) 发送非应答信号“1”

```
NAS: SETB SDA
      SETB SCL
      NOP
      NOP
      CLR SCL
      CLR SDA
      RET
```

### (5) 应答位检查

正常应答时 F0 标志位“0”，否则 F0 为“1”。

```
ASK: SETB SDA
      SETB SCL
      CLR F0
```

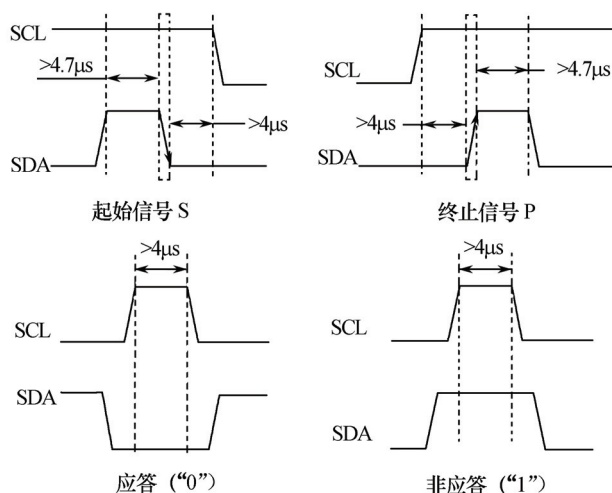


图 8.22 I<sup>2</sup>C 总线典型时序要求

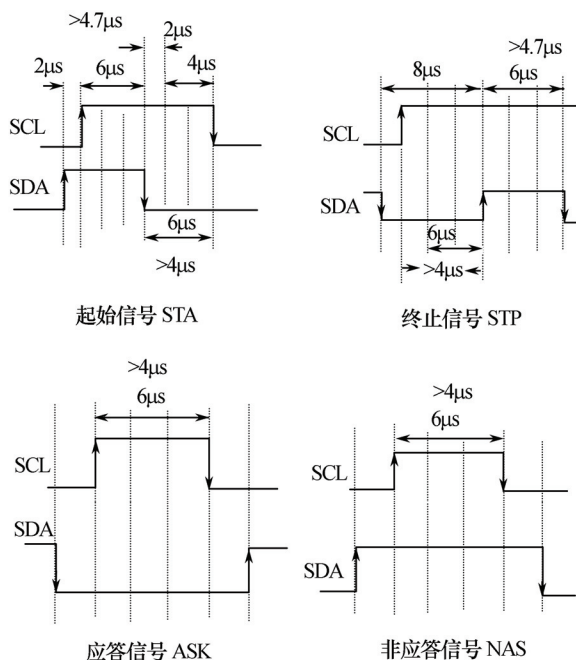


图 8.23 模拟时序



```

MOV  C,SDA
JNC  EXIT
SETB F0 ;非正常应答
EXIT: CLR  SCL
RET

```

### 3. I<sup>2</sup>C 总线的典型应用

I<sup>2</sup>C 典型的产品如 Atmel 公司的 AT24C02，它和单片机的连接如图 8.24 所示，通过程序模拟 I<sup>2</sup>C 串行总线通信方式。I<sup>2</sup>C 总线适用于通信速度要求不高而体积要求较高的应用系统。

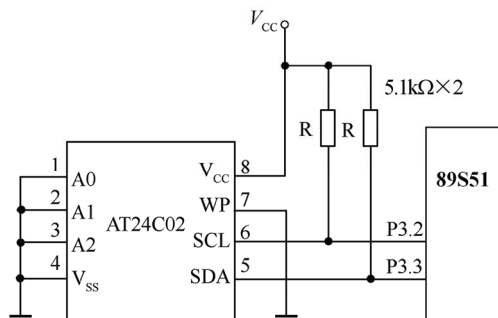


图 8.24 单片机与 I<sup>2</sup>C 总线器件的接口连线

AT24C02 是一个 2K 位串行 CMOS E<sup>2</sup>PROM，内部含有 256 字节（2K 位），有一个 16 字节页写缓冲器，该器件通过 I<sup>2</sup>C 总线接口进行操作，有一个专门的写保护功能。

#### (1) 引脚描述

**SCL**：串行时钟输入引脚，用于产生器件所有数据发送或接收的时钟。

**SDA**：双向串行数据/地址引脚，用于器件所有数据的发送或接收。SDA 是一个开漏输出引脚，可与其他开漏输出或集电极开路输出进行线或。

**A0A1A2**：器件地址输入端，这些输入脚用于多个器件级联时设置器件地址。

**WP**，写保护引脚。如果 WP 引脚连接到 V<sub>CC</sub>，所有的内容都被写保护，只能当 WP 引脚连接到 V<sub>SS</sub> 或悬空时，才允许器件进行正常的读/写操作。

#### (2) 写操作

对 AT24C02 写入时，单片机发出起始信号之后再发送的是控制字节，然后释放 SDA 线并在 SCL 线上产生第 9 个时钟信号。被选中的存储器器件在确认是自己的地址后，在 SDA 线上产生一个应答信号，单片机收到应答信号后就可以传送数据了。

传送数据时，单片机首先发送 1 字节的预写入存储单元的首地址，收到正确的应答后，单片机就逐个发送各数据字节，但每发送 1 字节后都要等待应答。单片机发出停止信号 P 后，启动 AT24C02 的内部写周期，完成数据写入工作（约 10ms 内结束）。

AT24C02 片内地址指针在接收到每一个数据字节后自动加 1，在芯片的“一次装载字节数”（页面字节数）限度内，只需输入首地址。装载字节数超过芯片的“一次装载字节数”时，数据地址将“上卷”，前面的数据将被覆盖。当要写的数据传送完后，单片机应发出终止信号以结束写入操作。*n* 个字节写入数据格式如图 8.25 所示。





图 8.25  $n$  个字节写入数据格式

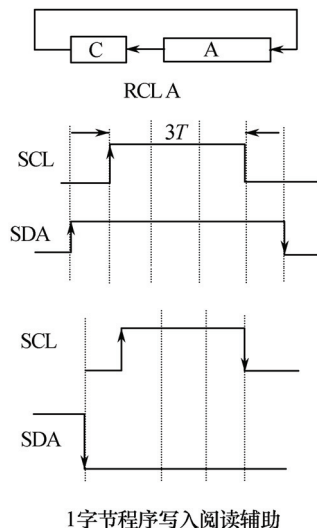
### ① 1 字节写入

设预发送的数据在 A 中，1 字节的写入程序设计如下，右边是程序阅读辅助。

```

WRB:  MOV  R0,#8      ;先发高位
WLP1:  RLC  A
      JC   WR1
      AJMP WR0
WLP2:  DJNZ R0,WLP1
      RET
WR1:   SETB SDA        ;发“1”
      SETB SCL
      NOP
      NOP
      CLR  SCL
      CLR  SDA
      AJMP WLP2
WR0:   CLR  SDA
      SETB SCL
      NOP
      NOP
      CLR  SCL
      AJMP WLP2

```



### ② 多字节的写入

入口条件：向 R1 送入发送数据缓冲区首地址

SNUM 送入发送字节数（含首地址）

SLAW 送入写寻址字节

```

WRNB:  LCALL STA      ;发送起始信号 S (STA 起始信号子程序)
      MOV  A, SLAW
      LCALL WRB        ;写寻址字节 (片选地址)
      LCALL ASKC       ;调用应答位检查子程序 ASKC
      JB   F0, WRNB
WLP:   MOV  A, @R1
      LCALL WRB        ;写入首地址，第 2 次循环便是数据
      LCALL ASKC       ;调用应答位检查子程序 ASKC
      JB   F0, WRNB

```

```

INC      R1
DJNZ     SNUM, WLP
LCALL    STP                ;送终止信号
RET

```

### (3) 读操作

单片机读 AT24C02 时，也要发送该器件的控制字节（“伪写”），发送完后释放 SDA 线并在 SCL 线上产生第 9 个时钟信号，被选中的存储器在确认是自己的地址后，在 SDA 线上产生一个应答信号作为响应。然后，单片机再发送首地址，在收到器件的应答后，单片机要重复一次起始信号并发出器件地址和读方向位（“1”），收到器件应答后就可以读出数据字节，每读出一个字节，单片机都要回复应答信号。当最后一个字节数据读完后，单片机应返回以“非应答”（高电平），并发出终止信号以结束读出操作。*n* 个字节读出的数据格式如图 8.26 所示。

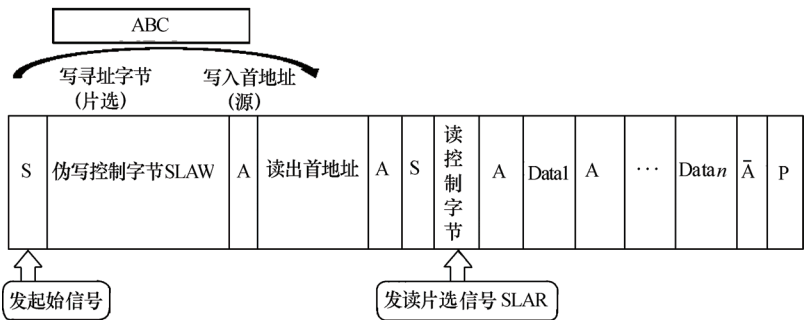


图 8.26 读出 *n* 个字节的数据格式

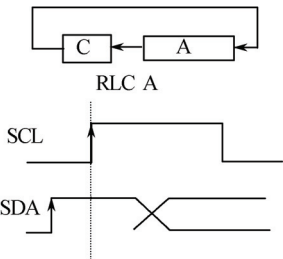
#### ① 1 字节读取

设读取的一个字节数据存于 R2 或 A 中，1 字节的读取程序设计如下：

```

RDB: MOV    R0, #8                ;读入前先置 1,类似单片机读 I/O 的操作
RLP: SETB   SDA
      SETB   SCL
      MOV    C, SDA
      MOV    A, R2
      RLC    A
      MOV    R2, A
      CLR    SCL
      DJNZ   R0, RLP
      RET

```



1 字节读出程序阅读辅助

#### ② *n* 字节的读取

入口条件：R1 送入接收缓冲区首地址，RNUM 送入接收字节数，SLAR 送入读寻址字节。

```

RDNB: LCALL STA                ;发起起始信号
      MOV    A, SLAR            ;发寻址字节（即片选）
      LCALL  WRB                ;发送一个字节（即片选）
      LCALL  ASKC               ;检查应答
      JB     F0, RDNB
      RNLP: LCALL RDB            ;读 1 字节
      MOV    @R1, A             ;读 1 字节
      DJNZ   RNUM, FASK         ;读 1 字节

```

```

        LCALL NAS           ;完毕,发非答位
        LCALL STP          ;发终止
        RET
FASK:   LCALL ASK          ;发应答位“0”
        INC     R1
        SJMP    RNLP

```

#### (4) 应用示例

**【例 8-6】** 接口电路如图 8.24，编程实现向 AT24C02 的 50H~57H 单元写入 00H、11H、22H、33H、44H、55H、66H、77H 所示共 8 个数据。

**解** 由题意及电路图可知，SLAW=A0H(10100000B)，AT24C02 接收数据区首地址 50H 及 8 个数据先放在单片机内部 RAM 的 30H~38H 单元。

```

SDA     EQU     P3.3
SCL     EQU     P3.2
SNUM    EQU     40H
SLAW    EQU     41H
        ORG     0000H
        AJMP    MAIN
        ORG     0040H
MAIN:    MOV     SP, #5FH
        CALL    LDATA          ;初始化
        MOV     SLAW, #0A0H    ;设寻址控制字节（片选信号）
        MOV     SNUM, #9       ;1 个首址,8 个数据
        MOV     R1, #30H
        CALL    WRNB
        SJMP    $
LDATA:   MOV     R0, #30H       ;初始化数据区：50H、00H、11H...
        MOV     @R0, #50H      ;AT24C02 接收区首址
        INC     R0
        MOV     @R0, #00H
        INC     R0
        MOV     @R0, #11H
        INC     R0
        MOV     @R0, #22H
        INC     R0
        MOV     @R0, #33H
        INC     R0
        MOV     @R0, #44H
        INC     R0
        MOV     @R0, #55H
        INC     R0
        MOV     @R0, #66H
        INC     R0
        MOV     @R0, #77H

```

50H	00H
51H	11H
57H	77H

AT24C02  
内部待写入的数据

30H	50H
31H	00H
32H	11H
	⋮
38H	77H
41H	A0H
40H	9

CPU 内 RAM 中单元数据

```
RET
END
```

【例 8-7】接口电路如图 8.24 所示，编程实现从 AT24C02 的 50H~57H 单元读出 8 字节数据，并将其存放在单片机内部 RAM 的 40H~47H 单元。

解 由题意可知：SLAW=A0H（写），SLAR=A1H（读），AT24C02 读数据区首地址 50H。

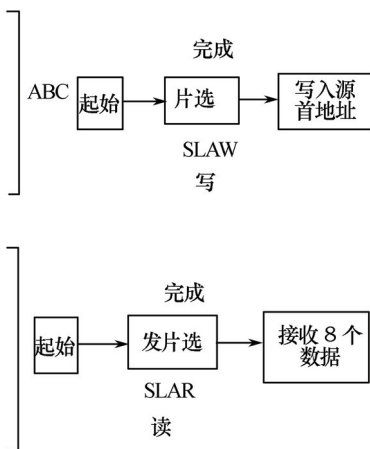
```
SDA    EQU    P3.3
SCL    EQU    P3.2
SNUM    EQU    4AH
SLAW    EQU    4BH
RNUM    EQU    4CH          ;接收字节数单元
SLAR    EQU    4DH          ;寻址字节单元

ORG     0000H
AJMP    MAIN
ORG     0040H

MAIN:   MOV     SP, #5FH      ;(ABC 段)
        MOV     @R1, #50H    ;(ABC 段)源址
        MOV     SLAW, #0A0H  ;(ABC 段)写
        MOV     SNUM, #1     ;(ABC 段)
        CALL    WRNB         ;(ABC 段)伪写,写
                                入寻址的字节

        MOV     SLAR, #0A1H  ;设寻址控制字
                                节(读)

        MOV     RNUM, #8
        MOV     R1, #40H     ;目的地址
        CALL    RDNB
        SJMP    $
END
```



## 8.4.2 SPI 总线接口及其扩展

SPI（Serial Peripheral Interface，串行外部设备接口）总线是 Motorola 公司推出的串行外设总线，是一种全双工、高速、同步的通信总线，有两种操作模式：主模式和从模式。SPI 总线只占用 4 根线，既节约了芯片的引脚又为 PCB 的布局节省了空间，现已广泛用于 E<sup>2</sup>PROM、A/D、D/A、移位寄存器、显示驱动器等多种 IC 器件。

### 1. SPI 总线概述

SPI 总线结构如图 8.27 所示。

SPI 接口有 4 个引脚：SCLK，MISO，MOSI 和  $\overline{SS}$ 。

MOSI (Master Out Slave In，主出从入)：主器件的输出和从器件的输入，用于主器件到从器件的串行数据传输。当 SPI 作为主器件时，该信号是输出；当 SPI 作为从器件时，该信号是输入。

数据传输时最高位在先，低位在后。根据 SPI 规范，多个从机可以共享一根 MOSI 信号线。在时钟边界的前半周期，主机将数据放在 MOSI 信号线上，从机在该边界处获取该数据。

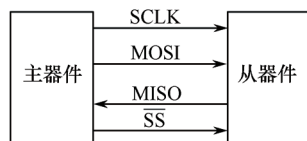


图 8.27 SPI 总线结构

**MISO (Master In Slave Out, 主入从出):** 从器件的输出和主器件的输入, 用于实现从器件到主器件的数据传输。当 SPI 作为主器件时, 该信号是输入; 当 SPI 作为从器件时, 该信号是输出。数据传输时最高位在先, 低位在后。SPI 规范中, 一个主机可连接多个从机, 因此, 主机的 MISO 信号线会连接到多个从机上, 或者说, 多个从机共享一根 MISO 信号线。当主机与一个从机通信时, 其他从机应将其 MISO 引脚驱动置为高阻状态。

**SCLK (SPI Clock, 串行时钟信号):** 串行时钟信号是主器件的输出和从器件的输入, 用于同步主器件和从器件之间在 MOSI 和 MISO 线上的串行数据传输。当主器件启动一次数据传输时, 自动产生 8 个 SCLK 时钟周期信号给从机。在 SCLK 的每个跳变处 (上升沿或下降沿) 移出一位数据。所以, 一次数据传输可以传输一个字节的数据。

SCLK、MOSI 和 MISO 通常和两个或更多 SPI 器件连接在一起。数据通过 MOSI 由主机传送到从机, 通过 MISO 由从机传送到主机。SCLK 信号在主模式时为输出, 在从模式时为输入。

**$\overline{SS}$  (Slave Select, 从机选择信号):** 这是一个输入信号, 主器件用它来选择处于从模式的 SPI 模块。主模式和从模式下,  $\overline{SS}$  的使用方法不同。在主模式下, SPI 接口只能有一个主机, 不存在主机选择问题, 该模式下  $\overline{SS}$  不是必需的。主模式下通常将主机的  $\overline{SS}$  引脚通过 10k $\Omega$  的电阻上拉高电平。每个从机的  $\overline{SS}$  接主机的 I/O 口, 由主机控制电平高低, 以便主机选择从机。在从模式下, 不管发送还是接收,  $\overline{SS}$  信号必须有效, 因此在一次数据传输开始之前必须将  $\overline{SS}$  置为低电平。SPI 主机可以使用 I/O 口选择一个 SPI 器件作为当前的从机。

SPI 系统数据交换的时序信号定义如图 8.28 所示, 在  $\overline{SS}$  信号有效后, SPI 芯片被选中, 在 SCLK 的控制下, 数据传送在 MOSI/MISO 总线上进行, 从高位至低位逐位传送。8 位送完,  $\overline{SS}$  信号复位, 传送结束。

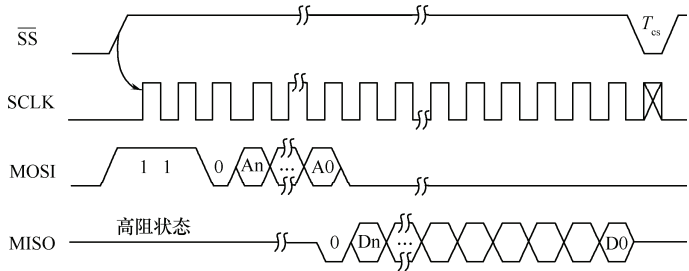


图 8.28 SPI 总线数据/时钟时序示意图

MCS-51 单片机中, 多数单片机内部没有 SPI 接口, 可以用软件控制 I/O 引脚的电平时序来模拟 3 条总线。

## 2. SPI 总线应用举例

AT93C46 是 Atmel 公司推出的具有 SPI 总线接口的串行 E<sup>2</sup>PROM 芯片, 采用 CMOS 技术, 具有 128 字节的存储容量, 可重复写 100 万次, 字节写入时间最大 10ms。AT93C46 的引脚排列与内部结构如图 8.29 所示。

(1) AT93C46 的引脚功能

CS: 片选端, 高电平有效;

SK: 同步时钟端, 上升沿触发;

DI: 数据输入端;

DO: 数据输出端;

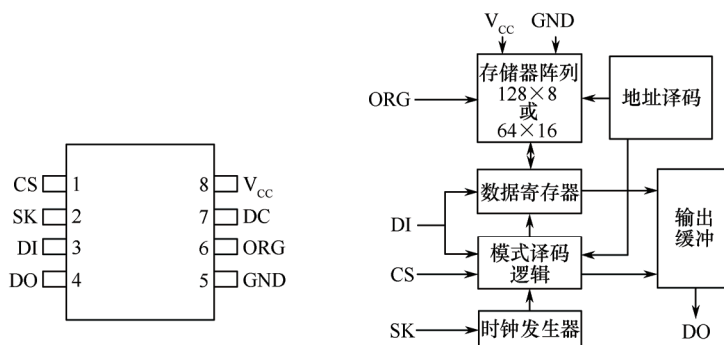


图 8.29 AT93C46 的引脚排列与内部结构图

ORG: 接地输出 8 位数据, 接高电平或悬空输出 16 位数据;

DC: 空脚;

VCC: 电源+5V;

GND: 接地端。

## (2) AT93C46 的控制指令

AT93C46 的 7 条控制指令见表 8.9。

每条指令分 3 个部分: ①起始位和操作码: 起始位为逻辑“1”, 起始位之后跟操作码;

②操作地址部分: 操作码后面接操作地址, 若操作的对象是字节, 则地址为 A6~A0, 共 7 位; 若操作的对象是字, 则地址为 A5~A0, 共 6 位; ③操作数据部分。

7 条指令的含义是:

ERAL: 所有存储单元擦除指令。将芯片整体擦除, 即使全体单元内容为“FFH”。

表 8.9 AT93C46 控制指令集

指令	起始位	操作码	字节地址	字地址	字节数据	字数据	内容
ERAL	1	00	10×××××	10××××	空		所有存储单元擦除
ERASE	1	11	A6~A0	A5~A0	空		指定单元擦除
EWDS	1	00	00×××××	00××××	空		写禁止
EWEN	1	00	11××××	11×××	空		写允许
READ	1	10	A6~A0	A5~A0	空		指定单元读
WRAL	1	00	01×××××	01××××	D7~D0	D15~D0	所有存储单元写入
WRITE	1	01	A6~A0	A5~A0	D7~D0	D15~D0	指定单元写

ERASE: 指定单元擦除指令。对指定地址进行擦除操作, 即使指定单元内容为“FFH”。擦除期间, DO 引脚电平为“0”, 擦除结束, DO 引脚电平为“1”。

EWDS: 写禁止指令。该指令可对已写入的数据进行写保护。

EWEN: 写允许指令。允许对芯片进行擦写操作。芯片上电后, 自动进入禁止擦写状态, 故在进行擦写操作之前, 须先执行该指令。

READ: 读指定单元指令。对指定地址进行读操作, 即将指定单元数据通过 DO 读出, 先读出最高位, 最后读出最低位。

WRAL: 写所有存储单元指令。对芯片整体进行写操作。

WRITE: 写指定单元指令。对指定地址进行写操作, 即将数据通过 DI 写入指定单元, 先写最高位, 最后写最低位。写字节最大用时 10ms。

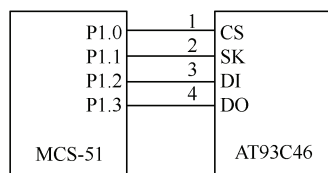


图 8.30 AT93C46 和 MCS-51 的连接

AT93C46 和 MCS-51 的连接有两种方式: 一种是四线制, 将 SPI 芯片的 CS、SK、DI 和 DO 引脚分别连接到 MCS-51 的 4 个 I/O 端口; 另一种是三线制, 是将 SPI 芯片的 DI 和 DO 并联后作为一条线连接到 MCS-51 的一个端口。AT93C46 和 MCS-51 的四线制连接如图 8.30 所示。

MCS-51 单片机通过软件产生 SPI 接口所需的时序, 完成指令的输出和数据的读/写。

【例 8-8】将 MCS-51 RAM 区首地址 40H 开始的 8 字节数据写入 AT93C46 中首地址 40H 开始的存储区中。

解 汇编参考程序在“程序附件”中, 请登录华信教育资源网 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn) 下载。

### 8.4.3 CAN 总线

CAN (Controller Area Network, 控制器局域网) 总线是应用最广泛的现场总线之一, 它是一种有效支持分布式控制或实时控制的串行通信网络。CAN 总线最早是由德国 Bosch 公司在 20 世纪 80 年代初为解决现代汽车中众多的控制与测试仪器之间的数据交换而开发的一种串行数据通信协议, 它是一种多主总线, 通信介质可以是双绞线、同轴电缆、光纤, 通信速率可达 1Mbps。CAN 总线通信接口中集成了 CAN 协议的物理层、数据链路层功能, 可完成对通信数据的成帧处理, 包括位填充、数据块编码、循环冗余校验、优先级判别等工作。

CAN 具有十分优越的特点:

- ① 多主机依据优先权进行总线访问, 任一节点在任何时候都可以主动地向网络上的其他节点发送信息;
- ② 无破坏性的基于竞争的仲裁, 发生碰撞 (多主同时发送) 时, 优先级较低的节点会主动退出总线发送, 而最高优先级的节点可不受影响地继续传输数据, 从而大大节省了总线冲突时间;
- ③ 数据传输距离可长达 10km, 传输速率可高达 1Mbps;
- ④ 可靠的错误处理和检错机制, 发送的信息遭到破坏后可自动重发;
- ⑤ 报文不包含源地址或目标地址, 仅用标志符来指示功能信息和优先级信息;
- ⑥ 节点在错误严重的情况下具有自动退出总线的功能;
- ⑦ 借助接收滤波的多地址帧传送。

CAN 协议的一个最大特点是废除了传统的站地址编码, 代之以对各种通信帧 (数据块) 进行编码。如数据帧具有标准格式和扩展格式两种格式, 两种格式区别在于其标识符 (Identifier) ID, 标准格式和扩展格式的 ID 分别由 11 位和 29 位二进制数组成。CAN 协议就是通过通信帧的 ID 来收发数据的, 每个节点都需要通过软件配置一个 ID 表 (在该节点的验收滤波器单元中), 如果总线上的数据包的 ID 号在该节点的 ID 表中存在, 则数据包成功通过该节点的验收滤波器单元的验收, 并将被送到上层软件处理单元进行相应的数据处理, 否则, 该数据包被丢弃。节点的 ID 表是通过软件进行配置的, 但验收滤波功能却是通过 CAN 控制器中的验收滤波器进行的, 所以从速度上来说, 验收造成的延迟很小。通信帧的数据段长度最多为 8 字节, 可满足通常工业领域控制命令、工作状态及测试数据的一般要求。同时, 8 字节不会占用总线时间过长, 从而保证了通信的实时性。CAN 协议采用 CRC 检验并可提供相应的错误处理功能, 保证

了数据通信的可靠性。CAN 卓越的特性、极高的可靠性和独特的设计,使其在工业控制、医疗电子、家用电器及传感器等领域得到了广泛的应用。

CAN 协议是建立在 ISO-OSI 7 层开放互连参考模型基础之上的。但 CAN 协议只定义了模型的最下面两层:数据链路层和物理层,仅保证了节点间无差错的数据传输。CAN 的应用层协议由 CAN 用户自行定义,或采用一些国际组织制订的标准协议。CAN 总线协议具有两个国际标准,分别是 ISO11898 和 ISO11519。

CAN 总线可以工作在多主方式,网络上任意一个节点均可以在任意时刻主动向网络上的其他节点发送信息,不分主从。CAN 节点只需对报文的标识符滤波即可实现一对一、一对多及全局广播方式发送和接收数据,其节点可分成不同的优先级,节点的优先级可通过报文标识符进行设置,优先级高的数据最多可在 134 $\mu$ s 内传输,可以满足不同的实时要求。

CAN 总线采用非破坏性总线仲裁技术,由于 CAN 总线的状态取决于逻辑“0”而不是逻辑“1”,所以 ID 号越小的报文其优先权越高,只有取得优先控制权的节点才能成功地发出它的信息。当多个节点同时向总线发送信息出现冲突时,优先级低的节点会主动退出数据发送,而优先级高的节点可不受影响地继续传输数据,大大节省了总线冲突仲裁时间,在网络重载的情况下也不会出现网络瘫痪。

为保证数据通信的可靠性,CAN 总线采用 CRC 检验并可提供相应的错误处理功能,其节点在错误严重的情况下具有自动关闭输出功能,使总线上其他节点的操作不受影响。

对于 CAN 控制器的实现,可以选用 CAN 控制器,如 SJA1000。对于 CAN 收发器的实现,可以选用 CTM1050、TJA1050 等。

## 8.4.4 USB 总线

### 1. USB 总线基本情况

USB (Universal Serial Bus, 通用串行总线) 是一个外部总线标准,用于规范计算机与外部设备的连接和通信,是应用在 PC 领域的接口技术。USB 接口支持设备的即插即用和热插拔功能。USB 是在 1994 年年底由 Intel、康柏、IBM、Microsoft 等多家公司联合提出的。USB 具有传输速率快 (USB1.1 是 12Mbps, USB2.0 是 480Mbps, USB3.0 是 5Gbps), 使用方便, 支持热插拔, 连接灵活, 独立供电等优点, 可以连接鼠标、键盘、打印机、扫描仪、摄像头、闪存盘、手机、数码相机、移动硬盘、外置光软驱、USB 网卡、ADSL Modem、Cable Modem 等几乎所有的外部设备。

USB 接口可用于连接多达 127 个外设, 如鼠标、调制解调器和键盘等。USB 自从 1996 年推出后, 已成功替代串口和并口, 并成为当今个人计算机和大量智能设备的必配的接口之一。

USB 各版本区别、版本最大传输速率、速率称号、最大输出电流、协议推出时间:

USB1.0, 1.5Mbps (192KB/s), 低速 (Low-Speed), 500mA, 1996 年 1 月;

USB1.1, 12Mbps (1.5MB/s), 全速 (Full-Speed), 500mA, 1998 年 9 月;

USB2.0, 480Mbps (60MB/s), 高速 (High-Speed), 500mA, 2000 年 4 月;

USB3.0, 5Gbps (640MB/s), 超速 (Super-Speed), 900mA, 2008 年 11 月。

### 2. 单片机的 USB 接口原理与硬件实现方案

89C51 单片机本身并不含有 USB 接口, 需通过 USB 接口芯片进行扩展, 如 PDIUSBD12 (USB1.1 协议)。

PDIUSBD12 是 Philips 公司生产的完全符合 USB1.1 规范, 性能优化的 USB 器件, 采用 28 脚 SO 或 TSSOP 封装, 可以在 3.3 $\pm$ 0.3V 或 3.6~5.5V 两种电压下工作, 内部集成 SIE、320 字



节的 FIFO 缓存、收发器以及电压调整电路和终结电阻器，提供 2MB/s 速率的并行接口，具有全自治本地 DMA 功能，芯片提供的多重中断模式有利于批量和等时数据传输模式。芯片还提供了可编程时钟、上电复位和低电压复位电路。芯片提供了双倍的输入/输出缓冲，在批量模式达到 1MB/s 数据传输速率，同步模式也可达到 1MB/s 数据传输速率。

89C51 单片机通过 I/O 口控制 PDIUSB12 实现系统的 USB 接口功能，是单片机应用系统低成本开发 USB 外围设备的有效途径。

### 8.4.5 单总线（1-Wire）

#### 1. 概述

1-Wire 单总线是 Maxim 全资子公司 Dallas 的一项专有技术。与目前多数标准串行数据通信方式，如 SPI/I<sup>2</sup>C/Microwire 不同，它采用单根信号线，既传输时钟又传输数据，而且数据传输是双向的。它具有节省 I/O 口线资源、结构简单、成本低廉、便于总线扩展和维护等诸多优点。

1-Wire 单总线适用于单个主机系统，能够控制一个或多个从机设备。当只有一个从机位于总线上时，系统可按照单节点系统操作；而当多个从机位于总线上时，则系统按照多节点系统操作，如图 8.31 所示。

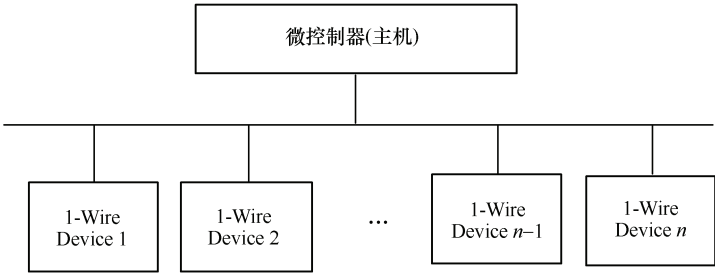


图 8.31 单主机多节点系统示意图

#### 2. 单总线的工作原理

单总线只有一根数据输入/输出线，可由单片机的 1 根 I/O 口线作为数据输入/输出线，所有的设备都挂在这根线上。设备（主机或从机）通过一个漏极开路或三态端口连至该数据线，以允许设备在不发送数据时能够释放总线，而让其他设备使用总线，其内部等效电路如图 8.32 所示。单总线通常要求外接一个约为 4.7kΩ 的上拉电阻，这样，当总线闲置时，其状态为高电平。主机和从机之间的通信可通过 3 个步骤完成，分别为初始化 1-Wire 器件、识别 1-Wire 器件和交换数据。由于它们是主从结构，只有主机呼叫从机时，从机才能应答，因此主机访问 1-Wire 器件都必须严格遵循单总线命令序列，即初始化、ROM 命令、功能命令。如果出现序列混乱，1-Wire 器件将不响应主机（搜索 ROM 命令、报警搜索命令除外）。

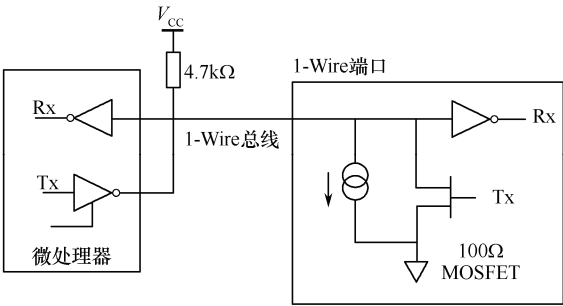


图 8.32 单总线的硬件接口示意图

## 本章小结

计算机之间的通信有并行和串行通信两种方式，串行通信分为异步串行通信和同步串行通信两种方式。

MCS-51 系列单片机内部集成了一个全双工的异步串行通信接口（UART），该接口的波特率和帧格式可以编程设定。它有 4 种工作方式：方式 0、1、2、3。每帧数据有 8 位、9 位。方式 0 和方式 2 的波特率是固定的，方式 1 和方式 3 的波特率是可变的，由定时器 1 的溢出率决定。

其他常用的串行总线扩展接口为：I<sup>2</sup>C 总线、SPI 总线、Microware 总线、1-Wire 总线、USB 总线和 CAN 总线。

I<sup>2</sup>C 总线是芯片间的串行传输总线。它用两根线实现全双工同步数据传输，可方便地构成多机系统和外围器件扩展。I<sup>2</sup>C 总线连线简单、结构紧凑，易于实现模块化和标准化。

SPI 总线同步串行外设接口，允许主设备和从设备以同步串行方式进行数据交换。

本章还对 CAN 总线、USB 总线、1-Wire 总线等进行了简单介绍。

## 习题及思考题

- 8.1 简述 MCS-51 单片机串行口的 4 种工作方式的接收和发送数据的过程。
- 8.2 串行口有几种工作方式？各工作方式的波特率如何确定？
- 8.3 若晶体的振荡频率为 11.0592MHz，串行口工作于方式 1，波特率为 4800bps，计算用 T1 作为波特率发生器的方式控制字和计数初值。
- 8.4 阅读图 8.33 所示的硬件图和相应的程序，说明所完成的功能，并将此汇编源程序修改为 C51 源程序。

```
MOV    SCON,#00H
MOV    P1,#0FFH
LOOP:  MOV    A,P1
        MOV    SUBF,A
        JNB    TI,$
        CLR    TI
        SJMP   LOOP
```

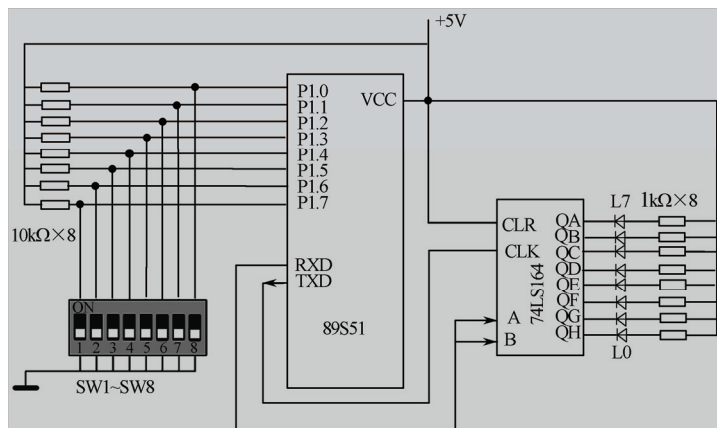


图 8.33 题 8.4 图

- 8.5 应用串行口控制的键盘和显示的硬件电路图如图 8.8 所示，试编写 C51 源程序。

8.6 简述 I<sup>2</sup>C 总线的数据传输方式。

8.7 编写程序将 AT89C51 单片机片内 40H~47H 单元中的 8 个 8 位数据通过 I<sup>2</sup>C 总线接口传送到存储器 AT24C01 的 50H~57H 单元中。

8.8 简述 SPI 总线的数据传输方式。

8.9 简要说明 CAN 总线、USB 总线、1-Wire 总线的特点。

8.10 将例 8.1 汇编源程序改为 C51 源程序。

## 第9章 80C51 单片机的系统扩展

### 9.1 I/O 接口电路概述

计算机与外部扩展设备的信息交换需要经过 I/O 接口电路,主要原因体现在以下几个方面。

#### 1. 计算机与外设的速度存在差异

外部设备的速度普遍低于计算机,例如继电器完成一次动作需要几毫秒,而计算机向外修改继电器所在 I/O 口的信息只需若干微秒,两者工作速度的差别为几百倍甚至几千倍。另一方面,微机系统的数据总线是传送信息的公共通道,总线如果被某一个设备长期占用会影响其他设备信号的传输,而且被选中的设备在短时间内,外设一般不可能启动并完成工作,例如继电器刚要开始响应,I/O 口输出信息就变化了,继电器的驱动就成为不可能。

#### 2. 输入/输出过程中的状态信号

计算机在与外设交换数据之前,必须查询外设的状态是否处于准备就绪的状态,准备好了才可以实现有效的输入/输出操作,而这种状态信息的产生和传递是接口电路的工作之一。另外计算机与外设之间这种状态信号的配合,特别是在时间上的配合,也是接口设计的最主要的任务之一。

#### 3. 计算机信号与外设信号之间的不一致

计算机信号与外设信号在许多场合是不一致的,信号的不一致主要是指信号电平和码型的不一致。如工业自动化控制系统中,绝大多数外部设备的驱动电平是24V 开关量,而计算机 CPU 的输出电平和这个是不匹配的,必须要依靠 I/O 接口电路实现电平电压的匹配。

综上所述,接口电路主要是为了解决计算机与外设工作速度不一致、信号不一致等问题而不得不采用的一种解决方法。

### 9.2 I/O 传送方式

单片机和外设之间数据的传送可以采用无条件传送、查询传送、中断传送和直接存储器存取4种传送方式。

#### 9.2.1 无条件传送方式

无条件传送也称为同步传送,这种传送方式的硬件和软件都很简单。此时,由软件去配合硬件实现传送。在读入或输出数据时,认为外围设备均已准备好,微处理器不必考虑外围设备的状态,就可用输入或输出指令传输信息。微处理器与无条件传送接口之间的连线除了地址线及数据线之外,只需外围设备读、写信号。因此,这种方式的硬件连接是最简单的。但是一旦硬件与软件在时间上配合得不好,将会导致传输出错。

无条件传送适用于以下两类外部设备的数据输入/输出。

① 具有状态保持或变化缓慢的数据信号的外部设备。外部设备的工作速度不快,而且两次数据传送的间隔时间足够长,有足够的时间使外设处于“准备好”的状态,例如继电器、指示灯、发光二极管、数码管等。

② 外部设备工作速度非常快，足以和 CPU 同步工作的外部设备，例如数模转换器 DAC。

## 9.2.2 查询传送方式

查询传送方式又称为有条件传送方式。不论是输入还是输出，CPU 均为主动的一方，I/O 进行数据操作之前，计算机首先要查询外部设备是否准备好，只有通过查询确信外部设备已处于“准备好”的状态，CPU 才能发出访问外设的指令，实现数据的交换。

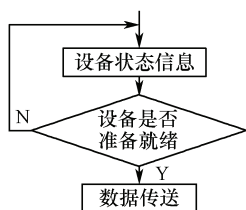


图 9.1 查询方式传送的一般流程

如图 9.1 所示。在查询的过程中单片机的传输效率较低，在传送数据时，外部设备必须是处于准备好或空闲状态，否则 CPU 就必须等待、不断查询。

## 9.2.3 中断传送方式

在查询传送方式中，CPU 主动要求传送数据，但是 CPU 又不能控制外设的工作速度，从而只能采用等待的方式来完成速度的匹配问题，非常浪费系统的资源。中断传送方式则是当外设完成数据传送的准备时，通过中断控制逻辑向 CPU 发出中断请求，在 CPU 可以响应中断的条件下，实现主程序被“中断”，在中断服务程序中完成一次 CPU 与外设之间的数据传送。

中断方式的出现消除了 CPU 在查询方式中的等待过程，大大提高了 CPU 的工作效率，同时中断方式的出现也使得计算机能“同时”处理多个外设，使得多个外设都能够同时工作。例如，一台高速计算机通过现场总线能同时接几十个外部设备，如传感器、伺服电机、温控仪表等，这些设备看上去都是在独立工作，实际上各个设备的中断请求总有一定的时间差别。

尽管中断接口电路相对其他几种方式来说比较复杂，同时会增加整个系统在硬件部分的开销。但在中断方式下，CPU 与外部设备近似并行地工作，CPU 无须了解外部设备的工作状态，每当收到外部设备主动发来的中断请求信号，就意味着外设当前准备好，CPU 就可立即与外部设备交换数据，因此在实际系统中常被广泛应用。

## 9.2.4 直接存储器（DMA）存取方式

DMA（Direct Memory Access）是一种外部设备和存储器之间直接传送数据的方式。当外设和存储器之间有大量的数据需要传送，或者外设的工作速度很快时，可以考虑采用这种直接存储器存取方式传送数据。

DMA 允许不同速度的外设之间直接沟通，而不需要依靠 CPU 的大量中断来实现数据的交换。

采用 DMA 方式的一个必要前提是 CPU 配备了 DMA 控制器（DMAC），也就是说，并不是所有的 CPU 都可以采用 DMA 方式，例如，MCS-51 单片机就不具备采用这种方式的功能。MCS-51 主要用作微处理器，一般不会有大量的数据在外设和存储器之间传送，所以没有这个功能也很自然。

## 9.3 存储器扩展及时序

80C51 有 16 根地址总线，因此具备 64KB 的寻址范围，但是芯片内部自带的存储容量远小于 64KB，在许多情况下，构成一个工业控制系统时，稍复杂的工作流程，片内存储器的容量不能满足要求。在这样的情况下，通常需要扩展片外的存储器来弥补片内硬件资源的不足。

### 9.3.1 系统扩展总线及扩展芯片的寻址方式

80C51 系列单片机数据总线和地址总线的低 8 位是分时复用的，因此当系统要扩展时，为了方便与各种芯片相连接，将 80C51 的外部引脚变为类似一般的三总线结构，即地址总线(AB)、数据总线 (DB) 和控制总线 (CB)，如图 9.2 (a) 所示。控制总线借用 P3 口的第二功能。

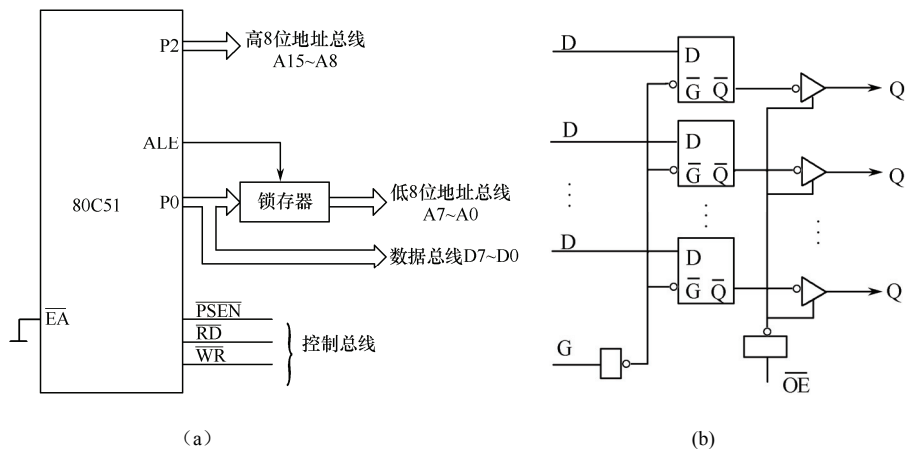


图 9.2 单片机总线结构及 74LS373 内部结构示意图

由于 P0 口既用作低 8 位地址总线，又用作数据总线（分时复用），因此需增加一个 8 位地址锁存器。80C51 访问外部扩展的芯片时，先发出低 8 位地址进入地址锁存器锁存，锁存器输出作为系统的低 8 位地址 (A7~A0)。80C51 的 ALE 信号作为锁存器选通信号，由时序可知，ALE 在下降沿 P0 口的地址输出信号才有效，所以在选用锁存器时，要注意 ALE 信号与锁存器选通信号的匹配。应选择锁存器为高电平触发或者下降沿触发的，例如 74LS373，其内部结构如图 9.2(b)所示，74LS373 是有输出三态门的电平允许 8D 锁存器。当 G（使能端）为高电平时，锁存器的数据输出端 Q 的状态与数据输入端 D 相同（透明的）。当 G 端从高电平返回低电平时（下降沿后），输入端的数据就被锁存在锁存器中，数据输入端 D 的变化不再影响 Q 端输出。若选择上升沿触发的锁存器 74LS273 或 74LS377，这时就需要把 ALE 信号先反相然后再接锁存器。

对外扩展的程序存储器和数据存储器的地址范围是重叠的，都是 0000H~FFFFH，地址总线和数据总线又都是公用 P0 和 P2 口。为了区分程序存储器和数据存储器，只好采用不同的控制信号线。扩展 ROM 时，用控制线  $\overline{\text{PSEN}}$ ；扩展 RAM 时，用控制线  $\overline{\text{RD}}$  和  $\overline{\text{WR}}$ 。

### 9.3.2 程序存储器扩展

#### 1. 单片机程序存储器

外部程序存储器一般使用 EPROM、E<sup>2</sup>PROM、Flash ROM，它们的接口基本相同，下面以传统的 27 系列芯片为例讨论。

#### 2. 单片机程序存储器的扩展连接及实例

程序存储器的连接可以按照数据总线、地址总线和控制总线分别进行连接。

数据总线的连接：P0 口直接与程序存储器的数据线 D0~D7 相连接。

地址总线的连接：P2 口用作系统的高 8 位地址线，再加上地址锁存器提供的低 8 位地址，便形成了系统完整的 16 位地址总线。

控制总线的连接：锁存器的锁存使能端 G 必须和单片机的 ALE 引脚相连；单片机的  $\overline{\text{PSEN}}$

端与程序存储器的输出允许信号端 $\overline{OE}$ 相连接。

51 单片机 CPU 外部程序存储器读出时序图如图 9.3 所示,下面通过例 9.1 来讲解时序原理。

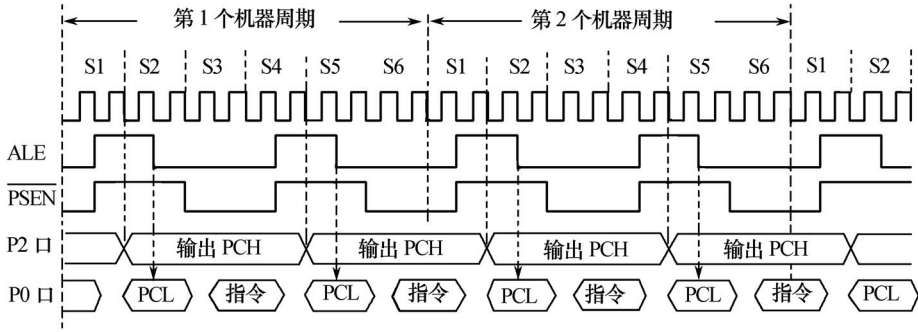


图 9.3 CPU 外部程序存储器读出时序图

**【例 9.1】**在 80C51 单片机片外扩展 64KB 的程序存储器。

**解** (1) 选择芯片 27512 (64KB)

根据题意选用单片 27512 即能满足要求。对一片程序存储器系统,可采用常选通方式,将其片选端接地。一般用作程序存储器的 EPROM 芯片不能锁存地址,故扩展时还应加 1 个锁存器,构成一个 3 片最小系统。

(2) 硬件电路图

80C51 单片机扩展一片 27512 程序存储器电路如图 9.4 所示。

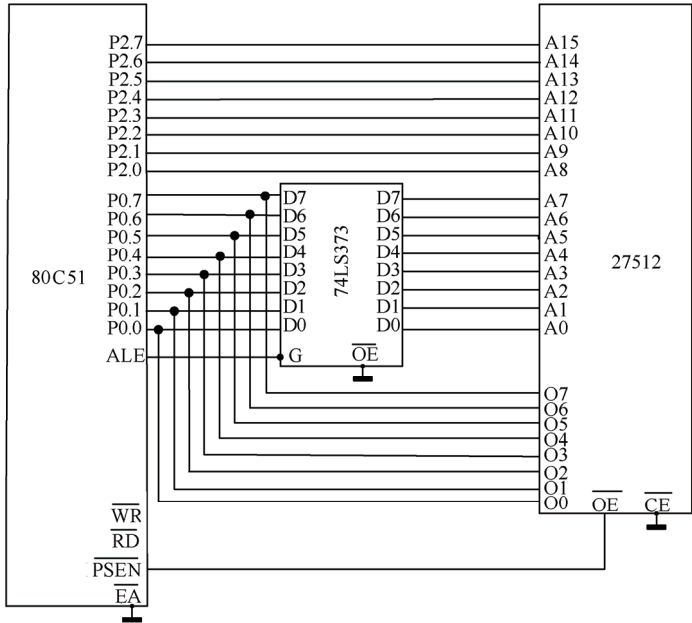


图 9.4 80C51 片外扩展 64KB 27512

注意: 图 9.4 中的 3 个接地处理。80C51 的 $\overline{EA}$ 脚接低电平, CPU 上电复位后从外部程序存储器的 0000H 开始执行程序, 所以对外扩展程序存储器系统,  $\overline{EA}$ 脚必须接低电平。74LS373 的 $\overline{OE}$ 端接地, 使之处于常选通状态。

### (3) 扩展总线的产生

27512 的  $\overline{\text{OE}}$  端接 80C51 的读选通信号端。在访问片外程序存储器时，只要  $\overline{\text{OE}}$  端出现负脉冲，即可从 27512 中读出程序。

### (4) 指令读出过程

一次代码的读出过程：图 9.4 中，在 ALE 和  $\overline{\text{PSEN}}$  上升沿后，P0 输出 PCL，P2 输出 PCH，P0 口数据稳定后在 ALE 的下降沿，CPU 允许外部电路锁存 PCL，此时锁存器的输出和 P2 口呈现完整的 16 位地址信息， $\overline{\text{PSEN}}$  下降沿后 P0 口便转为数据口输入状态， $\overline{\text{PSEN}}$  接到 27512 的  $\overline{\text{OE}}$  输出允许端，27512 在片选  $\overline{\text{CE}}$  有效时，便启动 ROM 工作，按照地址寻找地址所对应单元的内容，在  $\overline{\text{OE}}$  有效时，便将地址所对应单元的内容送到输出数据引脚，CPU 在  $\overline{\text{PSEN}}$  的上升沿自动采集 P0 引脚，将读到的数据即指令代码送入 CPU 指令寄存器，在这个过程中 P2 口的输出内容一直不变。

### (5) 外扩程序存储器地址范围的确定

27512 的片选端总是接地，其地址范围为：0000H~FFFFH。

#### 【例 9.2】Flash 扩展实例。

Flash 是一种新型的电擦除式存储器，它在 EPROM 工艺的基础上增添了芯片整体电擦除和可再编程功能。它既可作数据存储器用，又可作程序存储器用。

Flash ROM 型号很多，常用的有 29 系列和 28F 系列。29 系列有 29C256(32K×8 位)、29C512(64K×8 位)、29C010(128K×8 位)、29C020(256K×8 位)、29040(512K×8 位)等，28F 系列有 28F512(64K×8 位)、28F010(128K×8 位)、28F020(256K×8 位)、28F040(512K×8 位)等。

Flash 存储器的容量一般超过 64KB，而单片机的最大扩展容量也就 64KB，因此需要想出额外的办法来扩展芯片，给大容量芯片提供高位地址，否则 Flash 的容量得不到充分的利用。

有两种方法可以实现这种功能：一是采用硬件电路，另一是采用软件扩展的方法。软件扩展的方法就是采用专用的页面寻址存储器的方式来实现页面的切换。但是这种方式使用不方便且价格较高，因此常常采用硬件电路扩展的方式来实现。硬件的扩展通常是大容量存储器的低 16 位地址还是和一般存储器的地址线一样的连接，而高位的地址可以选择 P1 口中的一些口线来提供。

用 80C51 单片机扩展一片 29C256 Flash 存储器。

分析：

#### (1) 确定需要几根地址线

29C256 Flash 芯片具有 32KB×8 位的存储容量，因此，需要 15 根地址线 A0~A14。

#### (2) 确定三总线

① 数据线：29C256 的数据线 D7~D0 直接接 80C51 的 P0.7~P0.0。

② 地址线：29C256 的地址线低 8 位 A7~A0 通过锁存器 74LS373 与 P0 口连接，高 7 位 A8~A14 直接与 P2 口的 P2.0~P2.6 连接，P2 口本身有锁存功能。

③ 控制线：80C51 单片机与 29C256 的控制线连接采用了将外部数据存储器空间和程序存储器空间合并的方法，使得 29C256 既可以作为程序存储器使用，又可作为数据存储器使用。

④  $\overline{\text{CE}}$  片选线：直接接地。由于系统中只扩展了一片程序存储器芯片，因此，29C256 的片选端直接接地，表示 29C256 一直被选中。

80C51 与 29C256 扩展的连接图如图 9.5 所示。



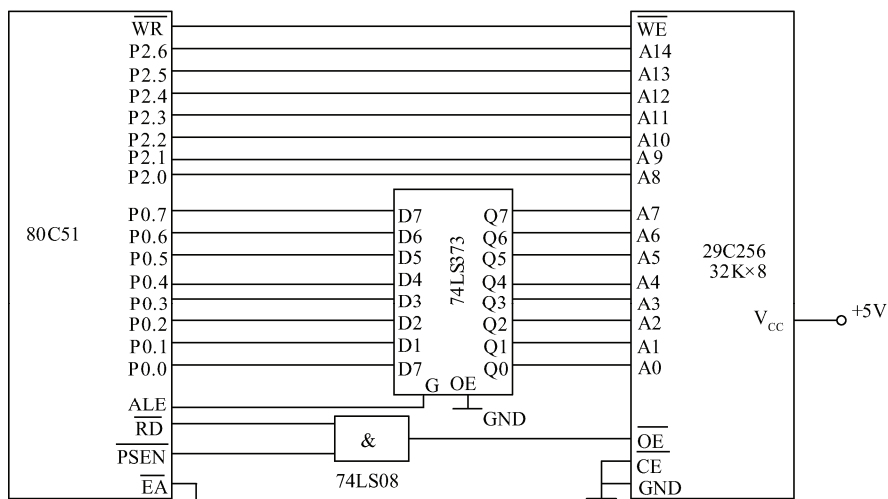


图 9.5 80C51 与 Flash 29C256 扩展连接图

### 9.3.3 数据存储器扩展

#### 1. 单片机数据存储器

外部数据存储器与程序存储器扩展设计方法基本相同，只是外部数据存储器的读/写信号要由  $\overline{\text{WR}}$  和  $\overline{\text{RD}}$  来实现。

#### 2. 静态 RAM 扩展实例

【例 9.3】单片机 80C51 应用系统扩展 8KB 静态 RAM。

解 (1) 芯片选择

根据题目容量的要求，选用 SRAM 6264。它是一种采用 CMOS 工艺制成的 SRAM，采用单一 +5V 供电，输入/输出电平均与 TTL 兼容，额定功耗 200mW，典型存取时间 200ns，28 线双列直插式封装。

6264 的引脚如图 9.6 所示。6264 有 13 根 (A0~A12) 地址线；8 根 (D0~D7) 双向数据线； $\overline{\text{CE}}$  为片选线，低电平有效； $\overline{\text{WE}}$  为写允许线，低电平有效； $\overline{\text{OE}}$  为读允许线，低电平有效。

(2) 硬件电路连接

单片机与 6264 的硬件连接如图 9.7 所示。

(3) 连线说明

地址线：A0~A12 连接单片机地址总线的 P0.0~P0.7、P2.0~P2.4，共 13 根。数据线由 P0.0~P0.7 和 6264 的 D0~D7 直接相连接。单片机的读、写控制端  $\overline{\text{RD}}$  和  $\overline{\text{WR}}$  分别与 6264 的  $\overline{\text{OE}}$  和  $\overline{\text{WE}}$  相连接，对 6264 的读、写操作进行控制，而片选端  $\overline{\text{CE}}$  由单片机的 P2.6 端控制。

(4) 片外 RAM 地址范围的确定及使用

按图 9.7 的连线，将 ALE 与 74LS373 的锁存控制端 G 相连。6264 的片内译码只需要 13 根地址线，而高三位地址线中只用了 A14 (P2.6) 参与译码，即为线译码方式。如果与 6264 无关的引脚 P2.7 和 P2.5 取“0”，那么，6264 的地址范围是 0000H~1FFFH。

单片机对 RAM 的读/写，如果地址范围超过 8 位，则采用如下的指令：

```
MOVX    @DPTR,A           ;向片外数据存储器内写入数据
MOVX    A,@DPTR           ;从片外数据存储器内读取数据
```

如果读/写的地址范围低于 8 位，则可以采用下面的两条指令：

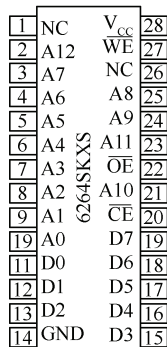


图 9.6 6264 引脚图

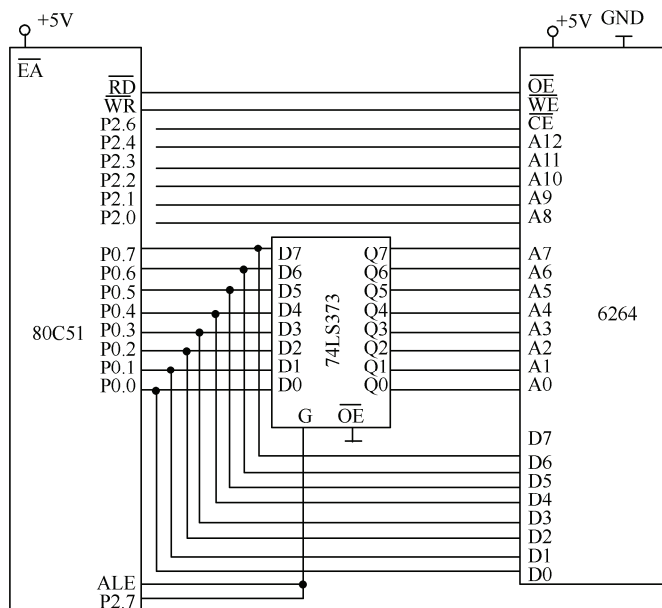


图 9.7 80C51 与 6264 扩展连接图

MOVX @Ri,A ;向低 256B 片外数据存储器写入数据

MOVX A,@Ri ;从低 256B 片外数据存储器读取数据

举例：对 6264 内部 1000H 单元进行读、写一个字节的程序段分别为：

MOV DPTR,#1000H

MOVX A,@DPTR ;对扩展 RAM 的读操作

MOV DPTR,#1000H

MOV A,#0AAH

MOVX @DPTR,A ;对扩展 RAM 单写入 AAH 操作

上面讲述的是对单片机分别进行程序存储器和数据存储器的扩展，通常情况下，这两种存储器都是同时扩展的，连线时只需要分别进行连线即可。各自芯片地址范围的确定同单独扩展存储器芯片的方式相同。

### 3. 时序操作原理

#### (1) 读操作时序

数据存储器读指令 MOVX A,@DPTR 的时序如图 9.8 所示(括号内的数据为一具体实例)，指令时序分析如下：在第 1 个机器周期的前半时序，CPU 到程序存储器读得操作码 E0H，经指令译码器分析得知这是 MOVX A,@DPTR 指令，于是 CPU 便开始进行片外 RAM 的读操作，首先由 P0 送出 DPL，P2 送出 DPH，在 ALE 下降沿锁存 P0 信息 DPL，外部数据存储器在片选有效后，便启动工作，会按照存储器地址总线上的信息寻找地址所对应单元的内容，CPU 在  $\overline{RD}$  下降沿后 P0 口自动转为数据口输入状态， $\overline{RD}$  一般是接在外部 RAM 的  $\overline{OE}$  输出允许端，外部 RAM 在  $\overline{OE}$  有效时，便将地址所对应单元的内容送到存储器输出数据引脚，CPU 在  $\overline{RD}$  的上升沿自动采集 P0 引脚来读取数据，并将读到的数据送入 CPU 累加器 A，在这个过程中 P2 的输出内容一直不变。

若 MOVX A,@DPTR (该指令代码为 E0H)，(DPTR)=5020H，片外 RAM 单元(5020H)=33H，其数据输出过程见图 9.8 时序图中括号中的数据。

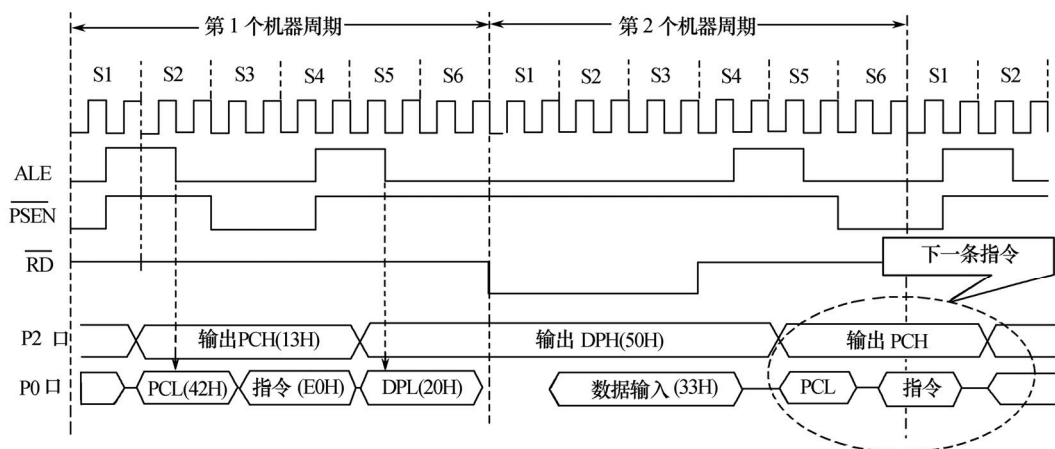


图 9.8 CPU 外部数据存储器读出时序图

若执行 `MOVX A, @Ri` 指令，来实现 `MOVX A, @DPTR` 任务，需采用以下程序片段：

```
MOV P2, #50H
MOV @R1, #20H
MOVX A, @R1
```

与 `MOVX A, @DPTR` 指令不同的是：执行 `MOVX A, @Ri` 时，在时序的第 2 个 ALE 上升沿后，P0 口送出的是 R1 中存储的数据 20H，P2 口输出 P2 锁存器的内容 50H。

#### (2) 写操作时序

数据存储器写指令是 `MOVX @DPTR, A`，该指令代码为 F0H，写时序如图 9.9 所示，括号内为 `MOV @DPTR, A`，(DPTR)=8000H，(A)=28H 时各口的输入/输出数据。

写指令时序分析类似读出操作，请读者自行分析。

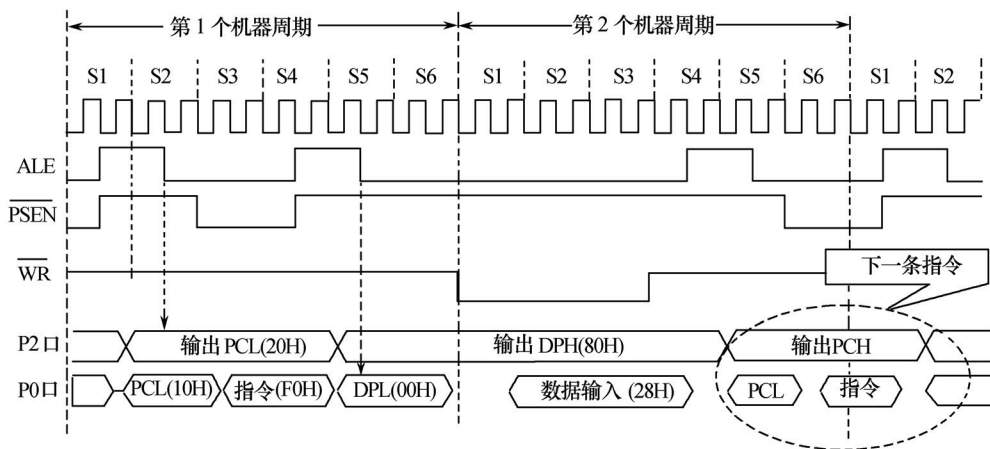


图 9.9 CPU 外部数据存储器写入时序图

### 9.3.4 简单 I/O 口扩展

80C51 单片机有 4 个 I/O 口 P0~P3，但考虑到程序存储器和数据存储器的扩展后，真正用作 I/O 口线的只有 P1 口的 8 位 I/O 口线和 P3 口的某些位线。因此，大多需要外部 I/O 接口的扩展。

简单的 I/O 口扩展就是采用通用 TTL、CMOS 锁存器和缓冲器等作为扩展芯片，通过 P0 口来实现扩展的一种方案。相对于价格昂贵的 I/O 扩展专用芯片，它具有电路简单、成本低、配置灵活等特点，因此，在单片机应用系统中经常被采用。

## 1. 简单输入口的扩展

如果对于简单开关量的输入，可以采用三态缓冲器，如74LS244（带三态8缓冲线驱动器）和74LS245（8双向总线收发器）等。

【例 9.4】以 74LS244 和 74LS32 的扩展应用为例，要求扩展 A, B, C, D 4 组 4 位拨码开关作为输入口。

解 如图 9.10 所示，74LS244 为 3 态 8 位缓冲器，一般用作总线驱动器。74LS244 没有锁存的功能。地址锁存器就是一个暂存器，它根据控制信号的状态，将总线上的地址代码暂存起来。

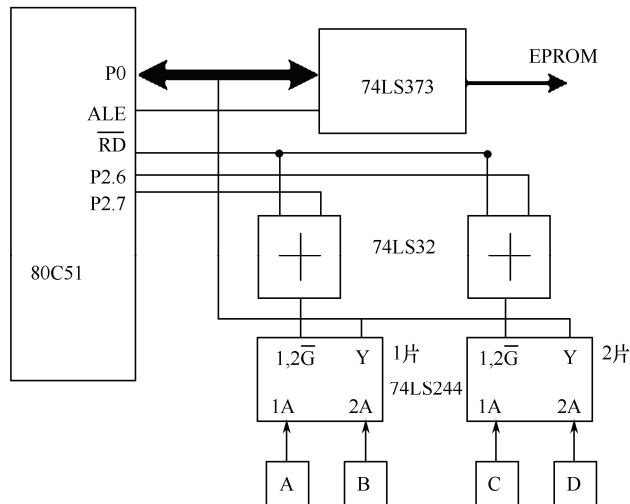


图 9.10 拨码开关电路图

74LS32 为或门，只有  $\overline{RD}$  和线选信号同时有效才能读入。74LS244 第 1 片的地址为 7FFFH，第 2 片的地址为 0BFFFH。读取拨码开关键值的子程序如下：

```
MOV DPTR, #7FFFH
MOVX A, @DPTR
MOV R4, A
MOV DPTR, #0BFFFH
MOVX A, @DPTR
MOV R5, A
```

## 2. 简单输出口的扩展

输出口扩展的主要目的是进行数据的锁存，如 74LS273 和 74LS373 等。下面以 74LS377 为例介绍。74LS377 为带有允许输出端的 8D 锁存器，有 8 个输入端，8 个输出端，1 个时钟输入端 CLK。当一个锁存允许信号到来时，CLK 端信号会出现一个上升沿，把 8 位输入数据打入 8 位的锁存器。

【例 9.5】通过 P0 口扩展一片 74LS377 锁存器作为输出口，该锁存器可以视作一个外部 RAM 单元。

使用 MOVX @DPTR, A 指令可以访问外扩的锁存器，输出控制信号为  $\overline{WR}$ ，接口逻辑如图 9.11 所示。

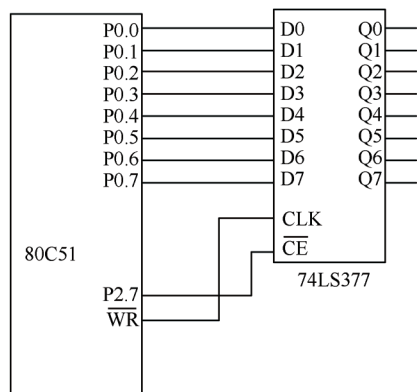


图 9.11 通过 74LS377 外扩锁存器

$\overline{\text{WR}}$  信号由 0 变为 1 时, 由于 74LS377 属于 D 触发器, 上升沿有效, 此时可由图中的 P0 口输出 8 位 TTL 电平信号经由 74LS377 锁存输出。

## 9.4 可编程 I/O 扩展接口芯片 81C55 及其应用

80C51 单片机内部资源有限, 除了通过锁存器的简单扩展方法外, 还可以扩展可编程的接口芯片。所谓可编程的接口芯片, 是指其功能可由微处理器的指令来加以定义的接口芯片, 利用编程的方法, 可以使一个接口芯片执行不同的接口功能。目前, 各生产厂家已提供了很多系列的可编程接口, 常用的有 81C55 可编程并行接口芯片; 82C55 可编程并行接口芯片; 8251A 可编程通信接口芯片; 8253 可编程定时器芯片; 8279 可编程键盘/显示接口芯片。MCS-51 系列单片机常用的两种接口芯片是 81C55 及 82C55, 本书主要介绍这两种芯片在 MCS-51 单片机中的使用。

### 1. 81C55 的内部结构和引脚排列

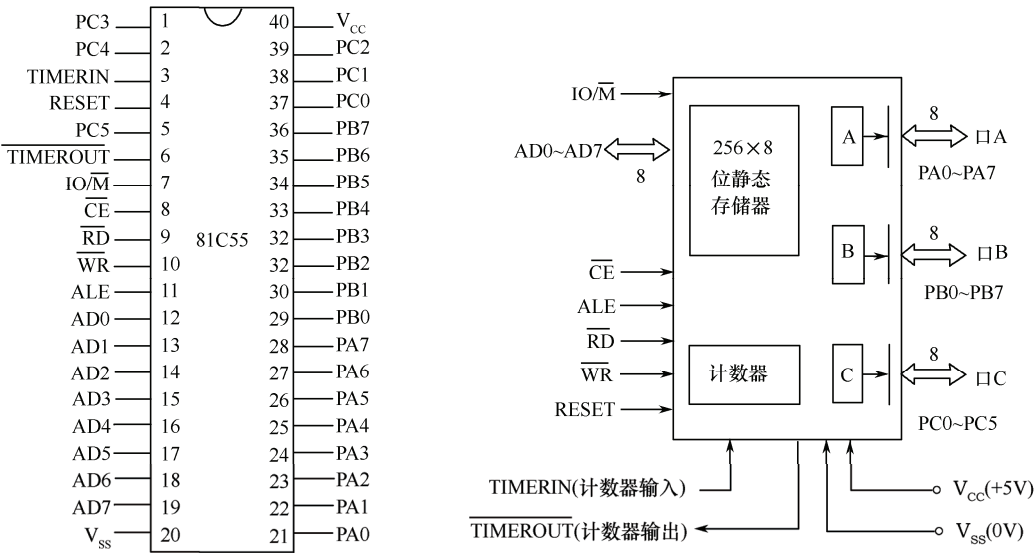
图 9.12 为 81C55 的引脚排列和内部结构图。

#### (1) 概述

81C55 的片内资源包含: 256B 的 RAM 存储器(静态), RAM 的存取时间为 400ns, 可编程的两个 8 位并行口 PA 和 PB, 可编程的一个 6 位并行口 PC, 以及一个 14 位的减 1 计数器。PA 口和 PB 口可工作于基本输入/输出方式或选通输入/输出方式。81C55 可直接与 MCS-51 相连, 不需增加任何硬件逻辑电路。

#### (2) 引脚

① 地址数据线(8 条): AD7~AD0, 为地址/数据线, 与 MCS-51 单片机的 P0 口相连, 用于分时传送地址/数据信息。



#### ② 控制线。

RESET: 复位信号, 输入高电平有效。在 RESET 端输入一个大于 600ns 宽的正脉冲时, 81C55 即可处于复位状态, PA、PB、PC 三口也定义为输入方式。

$\overline{\text{RD}}$  和  $\overline{\text{WR}}$ : 读/写控制信号输入线, 低电平有效。当  $\overline{\text{RD}}$  为 0 时 ( $\overline{\text{WR}}$  必为 1), 所选的

81C55 处于读状态, 81C55 送出信息到 CPU。如果当  $\overline{WR}$  为 0 时 ( $\overline{RD}$  必为 1), 此时 81C55 处于写入状态, CPU 送出信息写入 81C55。

$\overline{CE}$ : 片选线输入端, 低电平有效。

$IO/\overline{M}$ : 内部端口和静态数据存储器选择端。当  $IO/\overline{M}=1$  时, 选择的是 81C55 的端口操作; 如果  $IO/\overline{M}=0$  时, 则选择的是对 81C55 内的数据存储器进行操作。

$\overline{TIMERIN}$ : 定时/计数器时钟信号输入端。

$\overline{TIMEROUT}$ : 定时/计数器计数满时的溢出信号输出端。

电源线 (2条):  $V_{CC}$  为 +5V, GND 为地线。

③ I/O 口线 (22 条): PA0~PA7、PB0~PB7、PC0~PC5 为 22 条双向三态 I/O 总线, 分别与 A、B、C 口相对应, 用于 81C55 和外设之间传送数据, 数据传送方向由写入 81C55 的控制字决定。

3 个端口数据传送方式是由控制字和状态字来决定的。

### (3) 81C55 各端口地址分配

81C55 内部有 7 个端口, 需要 3 位地址 A2~A0 上的不同组合代码来加以区分。表 9.1 为端口地址分配。

表 9.1 单片机对 81C55 的操作及对应引脚状态

$\overline{CE}$	$IO/\overline{M}$	AD7~AD3	AD2	AD1	AD0	所选端口
0	1	×	0	0	0	C/S 寄存器
0	1	×	0	0	1	A 口寄存器
0	1	×	0	1	0	B 口寄存器
0	1	×	0	1	1	C 口寄存器
0	1	×	1	0	0	定时器低 8 位寄存器
0	1	×	1	0	1	定时器高 6 位寄存器
0	0	×	×	×	×	RAM 单元

## 2. 81C55 的命令字和状态字

81C55 中的 PA、PB、PC 口及计数器均可以编程控制, 单片机可以通过写命令字来进行对它们的控制, 可以通过读取状态字来了解它们所处的状态。命令字和状态字寄存器公用一个地址。工作方式由写入命令字寄存器的命令字来确定, 命令字只能写不能读; 状态字寄存器用来存入 PA 口和 PB 口的状态标志, 状态字只能读不能写。它们相当于是独立的两个寄存器。

### (1) 命令字

81C55 的命令字寄存器中的 D3~D0 位用来设置 PA 口、PB 口和 PC 口的工作方式。命令字格式如图 9.13 所示。

命令字每位的定义如下:

D4、D5 位用来确定 A 口、B 口以选通输入/输出方式工作时是否允许中断请求。

D6、D7 位用来设置计数器的操作。

另外, A 口和 B 口是输入口还是输出口还受到 C 口的工作方式的限制。C 口的工作方式有 4 种, 由命令字中的 PC1、PC2 两位来定义。在 C 口的 4 种工作方式下, A 口、B 口是指 A 口、B 口不需要进行联络和中断 (即与 C 口无关), 能直接传送数据, 而选通 I/O 口即 A 口或者 B 口必须由 C 口提供某些联络线才能进行数据的传送工作。

IEA 和 IEB 分别为 PA 和 PB 口的中断允许控制端, 高电平表示允许中断, 低电平为禁止中断。

TM2 和 TM1 两位则定义定时器的工作方式, 具体工作方式见图 9.13。

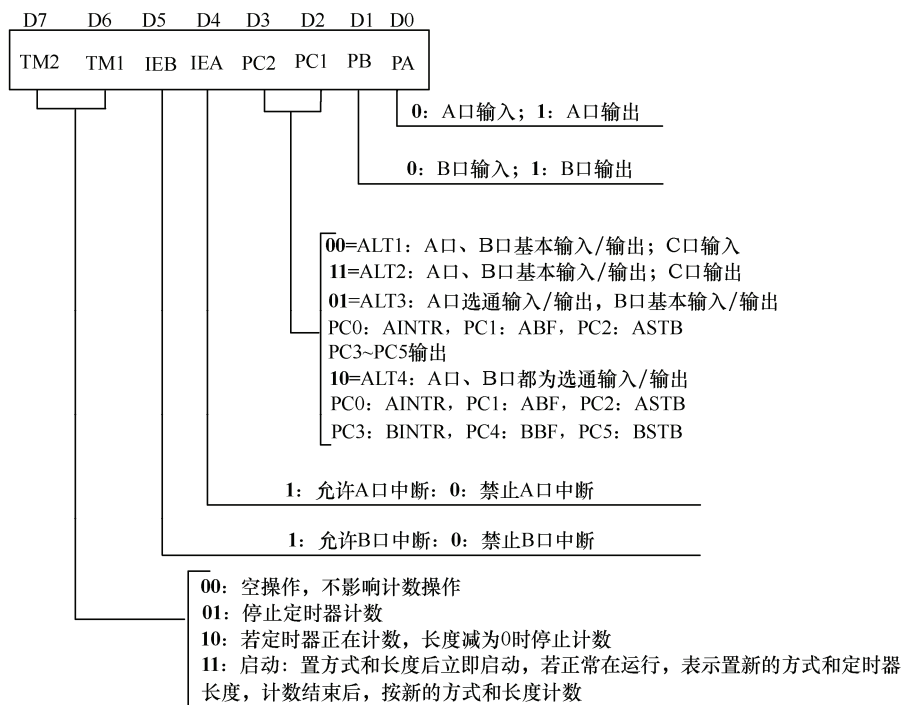


图 9.13 81C55 的命令字格式

## (2) 状态字

状态寄存器的 8 位中, 最高位为空位任意值, 单片机通过读取状态寄存器的相关数据来了解 I/O 口和定时器的的工作状态设定情况。状态字的格式如下:

INTRA、INTRB: 分别为 A、B 口的中断申请标志位, 高电平表示对应端口有中断请求, 低电平则表示端口没有中断申请。

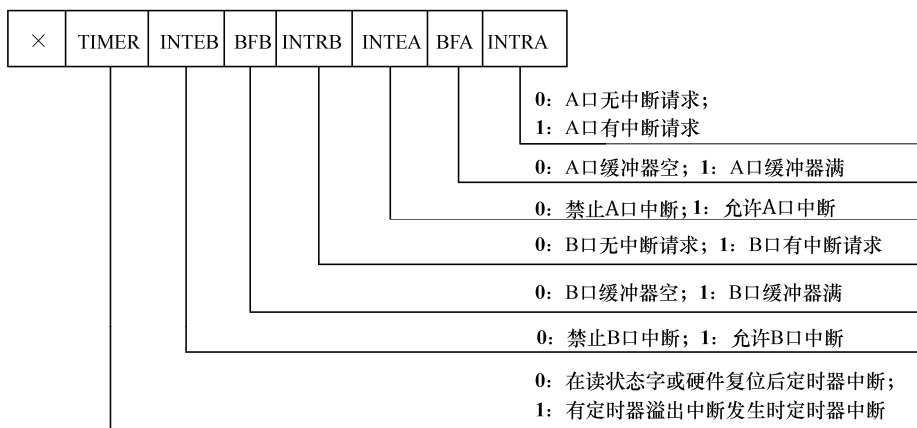


图 9.14 81C55 的状态字格式

BFA、BFB: 对应端口的缓冲器状态标志位, 高电平表示缓冲器装满数据, 外设或者单片机可以取走数据; 低电平则表示缓冲器是空的, 可以接收外设或者单片机发送来的数据。

INTEA、INTEB: 端口中断允许控制位, 高电平表示允许对应口中断, 低电平表示禁止端口中断。

状态寄存器中以上这 6 位是只有 A 口和 B 口作为选通口工作时才有的状态。例如, 当 81C55

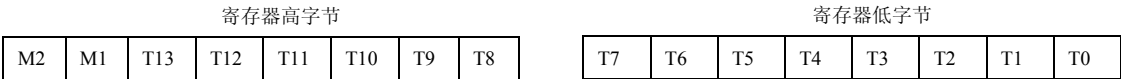


的 A 口或 B 口缓冲器接收到设备输入的数据或者从缓冲器中取走数据时,当缓冲器数据装满了则相应 BF 状态为“1”,当中断允许位为高电平,则中断请求线 INTR 升高为高电平,向 CPU 申请中断,CPU 对 81C55 相应的端口进行一次读或写的操作后,中断请求线自动变为低电平。

**TIMER:** 定时/计数器中断请求标志位,定时/计数器计数满时该位为“1”,当 CPU 读取状态之后,该位置“0”。

3. 81C55 的内部定时/计数器及使用方法

81C55 计数器的核心部件就是一个 14 位的减 1 计数/定时器。定时器启动后,定时器寄存器中的数值不断减“1”,直至计数值减至“0”。计数长度和计数方式由写入计数寄存器的控制字来决定,计数的速率取决于从 TIMERIN 引脚输入的脉冲频率,频率最高可达到 4MHz。



T0~T13: 计数器的长度。放置计数初值,计数初值范围为: 0002H~3FFFH。

M2、M1: 设置定时器的 4 种工作方式,各种方式下输出波形见表 9.2。

表 9.2 81C55 中定时器 4 种输出方式下的波形

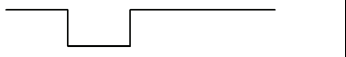
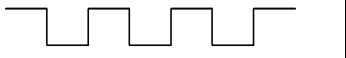


M2 M1	输出方式	计数值到时输出的波形
0 0	单方波	
0 1	连续方波	
1 0	单脉冲	
1 1	连续脉冲	

表9.2中各种波形输出的说明:

单方波: 计数期间输出为低电平,计数器计满回“0”后输出高电平。

连续方波: 计数长度的前半部分输出高电平,后半部分输出低电平,如果计数值为奇数个,则高电平为 $(n+1)/2$ 个,低电平为 $(n-1)/2$ 个。连续方波输出方式能自动恢复初值。

单脉冲: 计数器计满回“0”后输出一个单负脉冲。

连续脉冲: 计数值回“0”后输出单负脉冲,然后自动重装初值,回“0”后又输出单负脉冲,如此循环。

任何时候都可设置计数器长度和工作方式,将控制字写入控制寄存器。如果计数器正在计数,只有在写入启动命令后,计数器才接收新计数长度并按新的工作方式计数。

4. 81C55 与 MCS-51 的编程应用

单片机 P0 口输出的低 8 位地址不需要另外加锁存器(81C55 片内集成有地址锁存器),而直接与 81C55 的 AD0~AD7 相连,既可作为低 8 位地址总线,又可作为数据总线,地址锁存控制直接用 MCS-51 发出的 ALE 信号。

**【例 9.6】**如图 9.15 所示,如果在 81C55 的 B 口接 8 个按键,A 口接 8 个发光二极管,则下面的程序能够完成按下某一按键,相应的发光二极管发光的功能。

```
MOV  DPTR,#7F00H      ;指向 81C55 的控制口
MOV  A,#01H
MOVX @DPTR,A          ;向控制口写控制字,A 口输出,B 口输入
LOOP: MOV  DPTR,#7F02H ;指向 81C55 的 B 口
```



MOVX A,@DPTR	;检测按键,将按键状态读入 A 累加器
MOV DPTR,#7F01H	;指向 81C55 的 A 口
MOVX @DPTR,A	;驱动 LED 发光
LCALL DELAY	;调用一个延时程序
SJMP LOOP	

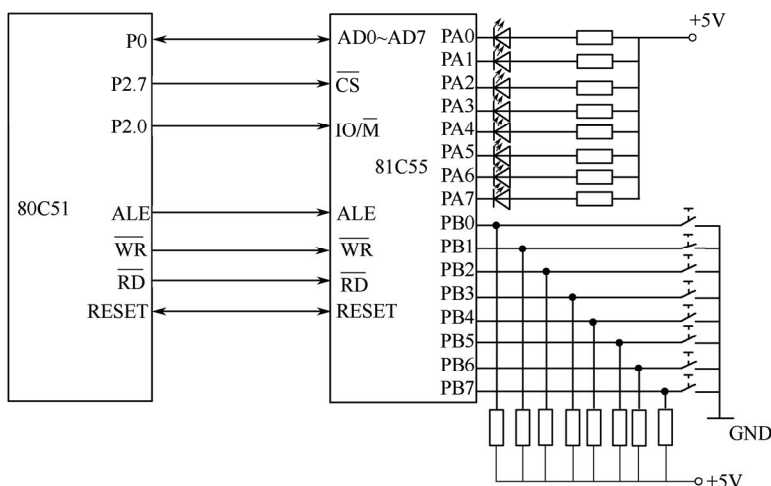


图 9.15 80C51 和 81C55 的接口电路

【例 9.7】如图 9.15 所示，若要求 A 口定义为基本输入方式，B 口定义为基本输出方式。读取 81C55，要求将立即数 AAH 写入 81C55 RAM 的 7E25H 单元。

MOV DPTR,#7F00H	;DPTR 指向命令状态寄存器地址
MOV A,#0C2H	;11000010 启动计数器,A 口输入,B 口输出
MOVX @DPTR,A	
MOV A,#0AAH	;立即数→A
MOV DPTR,#7E25H	;DPTR 指针指向 81C55 的 7E25H 单元
MOVX @DPTR,A	;立即数 AAH 送 81C55 RAM 的 7E25H 单元

## 9.5 可编程并行接口芯片 82C55 及其应用

### 1. 82C55 的内部结构和引脚排列

#### (1) 概述

82C55 芯片是 Intel 公司的可编程并行 I/O 接口芯片，芯片引脚及内部结构如图 9.16 所示。其内部资源包括：

- ① 3 个 8 位并行数据（或 I/O）端口 A、B、C；
- ② A 组和 B 组控制电路；
- ③ 8 位数据总线缓冲器及控制逻辑单元，包括：读/写、地址线、复位信号输入及片选输入共 6 线。

#### (2) 引脚

82C55 共 40 个引脚，引脚功能如下：

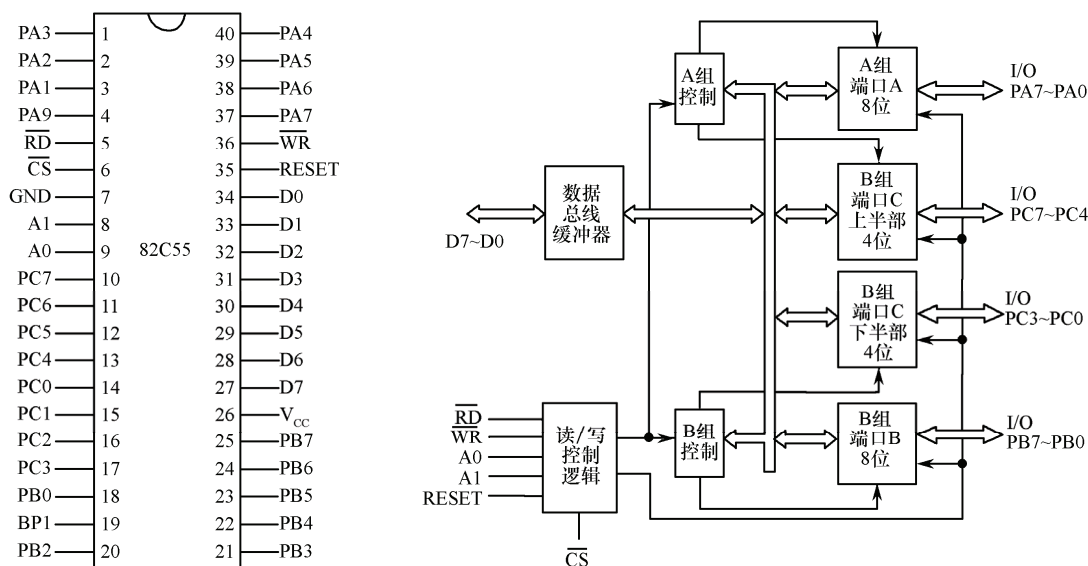


图 9.16 82C55 的内部结构和引脚图

D7~D0: 三态双向数据线, 与单片机的 P0 口连接, 用来与单片机之间传送数据信息。

$\overline{CS}$ : 片选信号线, 低电平有效, 表示本芯片被选中。

$\overline{RD}$ : 读信号线, 低电平有效, 读 82C55 端口数据的控制信号。

$\overline{WR}$ : 写信号线, 低电平有效, 用来向 82C55 写入端口数据的控制信号。

$V_{CC}$ : +5V 电源。

PA7~PA0: 端口 A 输入/输出线。

PB7~PB0: 端口 B 输入/输出线。

PC7~PC0: 端口 C 输入/输出线。

3 个 8 位并行口 PA、PB 和 PC, 都可以选为输入/输出工作模式, 功能和结构上有差异。

PA 口: 一个 8 位数据输出锁存器和缓冲器; 一个 8 位数据输入锁存器。

PB 口: 一个 8 位数据输出锁存器和缓冲器; 一个 8 位数据输入缓冲器。

PC 口: 一个 8 位的输出锁存器; 一个 8 位数据输入缓冲器。

通常 PA 口、PB 口作为输入/输出, PC 口既可作为输入/输出, 也可在软件控制下分为两个 4 位的端口, 作为端口 PA、PB 选通方式操作时的状态控制信号。

A1、A0: 地址线, 用来选择 82C55 内部的 4 个端口。

RESET: 复位引脚, 高电平有效。

## 2. 82C55 的寄存器

82C55 的内部有 4 个寄存器, 它们按口地址寻址, 口地址用 A0~A1 两根线来区分, 高 6 位则事先规定其数值即可。表 9.3 给出 82C55 内部各端口地址的偏移量及工作状态选择方式。

## 3. 82C55 的编程命令

82C55 的编程命令包括工作方式控制命令和对 PC 口的按位操作命令, 通过对控制字寄存器各位的配置、按位操作命令来实现。

### (1) 方式控制字

82C55 的工作方式可由 CPU 写入控制字到 82C55 的控制寄存器来选择, 82C55 有 3 种基本工作方式:

表 9.3 单片机对 82C55 的端口地址和工作状态选择表

A1	A0	$\overline{\text{RD}}$	$\overline{\text{WR}}$	$\overline{\text{CS}}$	工作状态
0	0	0	1	0	A口数据到数据总线
0	1	0	1	0	B口数据到数据总线
1	0	0	1	0	C口数据到数据总线
0	0	1	0	0	总线数据到A口
0	1	1	0	0	总线数据到B口
1	0	1	0	0	总线数据到C口
1	1	1	0	0	总线数据到控制字寄存器
×	×	×	×	1	数据总线为三态
1	1	0	1	0	非法状态
×	×	1	1	0	数据总线为三态

① 方式 0——基本输入/输出；

② 方式 1——选通输入/输出；

③ 方式 2——双向传送（仅 PA 口有此工作方式）。

3 种工作方式由控制字来决定，格式如图 9.17 所示。最高位 D7=1，为本方式控制字的标志，以便与另一控制字相区别（最高位 D7=0）。PC 口分两部分，随 PA 口称为 A 组，随 PB 口称为 B 组。其中 PA 口可工作于方式 0、1 和 2，而 PB 口只能工作在方式 0 和 1。

【例 9.8】设某一 51 单片机系统分配给 82C55 的基地址为 E000H（即 A 口地址）。编写一个将 A 口指定为方式 1 输入，C 口上半部定为输出；B 口指定为方式 0 输出，C 口下半部定为输出的 82C55 初始化程序段。

解 根据图 9.17 得到 82C55 的工作方式命令代码：10110000B 或 B0H。

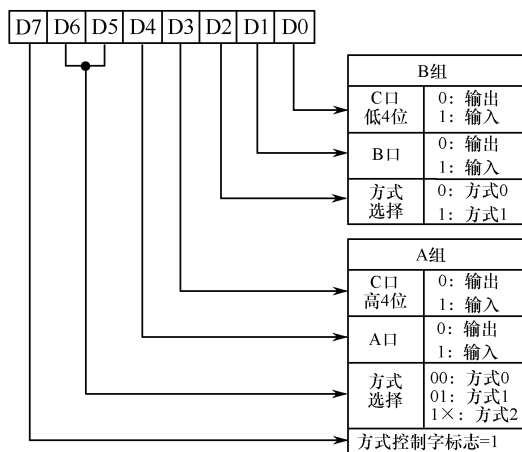


图 9.17 82C55 方式控制字格式

将此代码写入 82C55 的控制字寄存器，完成对 82C55 的初始化，初始化的程序段为：

```
MOV    DPTR,#0E003H    ;控制字地址=基地址+3
MOV    A,#0B0H          ;初始化命令
MOVX   @DPTR, A         ;送入控制字端口
```

注意：

① 82C55 的基地址是 A 口寄存器，而不是控制寄存器；

② 所有的可编程接口芯片，使用它们的步骤都是先定义，后使用；

③ 82C55 上电复位后，默认 3 个口均为方式 0 输入的工作状态，所以在使用 8255A 时，一定要先进行初始化工作，确定其工作方式。

## (2) PC 口按位置位/复位命令字

82C55 的端口 C 是一个特殊的 8 位并行口，在输出状态下，还可指定 C 口的某一位（某一个引脚）输出高电平或低电平，称为 C 口的按位置位/复位功能。并且，此功能不受工作方式的限制，而 A、B 口不具备按位置位/复位功能。

对 PC 口的按位操作命令，是通过对 82C55 的控制字寄存器写命令代码实现的，可对 PC 口按位置 1 或清 0。格式如图 9.18 所示。

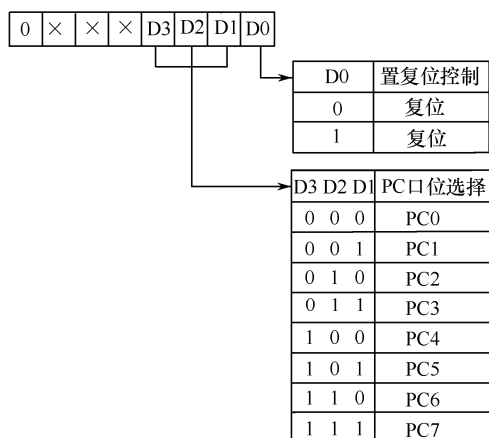


图 9.18 82C55 端口 C 按位置位/复位控制字格式

【例 9.9】设 82C55 已按要求初始化，82C55 的基地址（即 A 口地址）为 E000H，现要把 C 口的 PC6 引脚置成高电平。

解 根据题目要求可得命令字为 00001101B 或 0DH。在如例 9.8 完成对 82C55 的初始化后，通过执行如下程序段来实现本例的任务：

```
MOV    DPTR,#0E003H      ;控制字地址=基地址+3
MOV    A,#0DH             ;C 口按位置位、复位命令
MOVX   @DPTR,A           ;送入控制字端口
```

82C55 控制字与 C 口的按位置位/复位字很容易区别，只要看命令字中的最高位是否为 1 即可。

## 4. 82C55 与 MCS-51 的接口

### (1) 硬件接口电路

如图 9.19 所示为 MCS-51 扩展一片 82C55 的电路。P0.1、P0.0 经 74LS373 与 82C55 的 A1、A0 连接；P0.7 经 74LS373 与片选端  $\overline{CS}$  相连，其他地址线悬空；82C55 的控制线  $\overline{RD}$ 、 $\overline{WR}$  直接与单片机的  $\overline{RD}$  和  $\overline{WR}$  端相连；单片机的数据总线 P0.0~P0.7 与 82C55 数据线 D0~D7 连接。

### (2) 确定 82C55 端口地址

图 9.19 中，82C55 只有 3 条线与 MCS-51 地址线相接，片选端  $\overline{CS}$ 、端口地址选择端 A1、A0，分别接于 P0.7、P0.1 和 P0.0，其他地址线全悬空。显然，只要保证 P0.7 为低电平时，即可选中 82C55；若 P0.1、P0.0 再为“00”，则选中 82C55 的 PA 口。同理 P0.1、P0.0 为“01”、“10”、“11”分别选中 PB 口、PC 口及控制口。

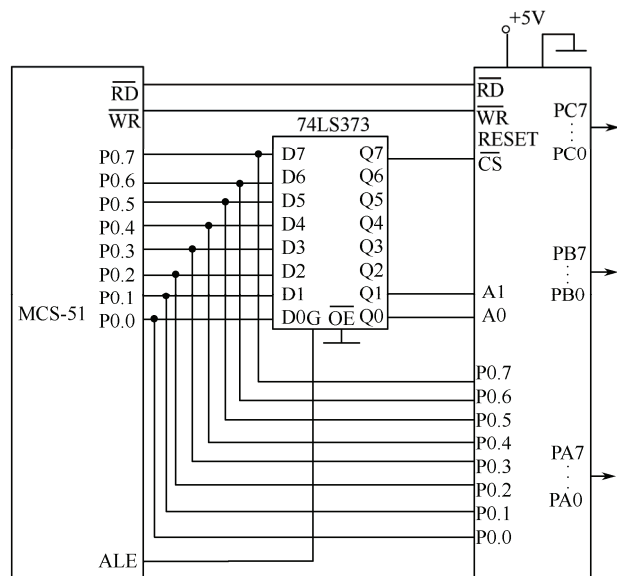


图 9.19 82C55 端口同 MCS-51 单片机接口电路

若端口地址用 16 位表示，其他无用端全设为“1”（也可把无用端全设为“0”），则 82C55 的 A、B、C 及控制口地址分别为 FF7CH、FF7DH、FF7EH、FF7FH。

如果没有用到的位取“0”，则 4 个端口地址分别为 0000H、0001H、0002H、0003H，只要保证  $\overline{CS}$ 、A1、A0 的状态，无用位设为“0”或“1”均可。

**【例 9.10】**如图 9.19 所示，利用 MCS51 单片机外扩一片 82C55 芯片，并控制其 PB 口的 8 个引脚输出 250Hz 的方波。

通过定时器 T0 的方式 2 定时 0.2ms（采用 12MHz 时钟），计时 10 次来实现 2ms 的定时，根据定时器 T0 方式 2 的计算公式，可以求得时间常数  $X=38H$ 。计满 2ms 后将 PB 口的引脚状态读取出来再取反，然后写回到 PB 引脚，从而产生 250Hz 方波。

82C55 控制寄存器的端口地址为 FF7FH，PB 端口的地址为 FF7DH。

参考程序如下：

```
#include <reg51.h>
unsigned char xdata * CTR = 0xff7f; //定义控制端口地址指针
unsigned char xdata * PB = 0xff7d; //定义 8255 PB 口地址指针
unsigned char a = 10; //定义定时中断的次数
void main ( )
{
    ACC = 0xff; //向累加器写入 0xff
    *CTR = 0x80; //向控制寄存器写入控制字
    TMOD = 0x02; //设置定时器 T0 工作方式 2
    TL0 = 0x38; //写入定时器计数初值
    TH0 = 0x38;
    ET0 = 1; //允许定时器 T0 中断
    EA = 1; //总中断允许
    TR0 = 1; //启动 T0
    while(1)
```

```

    {
    }
}

void time0( ) interrupt 1 using 0
{
    if (a>0)
    {a--;}
    else
    {
        ACC = *PB;           //读入 82C55 的 PB 口
        ACC = ~ACC;          //PB 口取反
        *PB = ACC;           //送 82C55PB 口，输出方波
        a = 10;
    }
}

```

## 9.6 单片机显示、键盘系统

为了实现人机交互，大多数的单片机应用系统，都要配置输入外设和输出外设。常用的输入外设设有键盘、BCD 码拨盘等；常用的输出外设设有 LED 数码管、LCD 显示器、打印机等。

显示器能帮助人们观察单片机显示的结果，是单片机系统输出的外部设备之一。现在常用的显示设备有 LED（发光二极管）、LCD（液晶显示器）等。LED 和 LCD 这两种显示器都具有功耗低、配置灵活、安装方便、寿命长等特点。同时，随着触摸屏的可靠性逐步提高，价格越来越低，触摸屏搭建的显示系统，还能够将控制按键整合在显示屏幕上，因此越来越受人们青睐，也开始成为一个主要的显示器。

### 9.6.1 LED 数码管显示接口

#### 1. LED 数码管的结构

数码显示器一般都做成七段加一个小数点的形式，依次命名为 a、b、c、d、e、f、g、dp，各段码对应的空间位置如图 9.20 所示。它能表现十六进制数字符。按其内部结构可分为共阴极型和共阳极型；按其外形尺寸有多种形式，使用较多的是 0.5"和 0.8"；按显示颜色也有多种形式，主要有红色和绿色；按亮度强弱可分为超亮、高亮和普亮。正向压降一般为 1.5~2V，额定电流为 10mA，最大电流为 40mA。

一位七段 LED 数码显示器内部包含 8 个发光二极管。为了应用方便，LED 数码显示器在出厂时做成如图 9.20（a）所示电路的结构之一。图 9.20（b）的结构，8 个发光二极管的负极接在一起，称之为共阴极数码管。对它最简单的驱动方法是：阴极接地，阳极分别加以驱动电流。图 9.20（c）的结构，8 个发光二极管的正极接在一起，称之为共阳极数码管。共阴极和共阳极的接法通常需要外接电阻来保证二极管合适的工作电压和电流，共阴极在二极管的阳极接上拉电阻，而共阳极则在阴极接下拉电阻。

#### 2. LED 数码管编码方式

二极管所显示的字形所对应的字形码格式为：

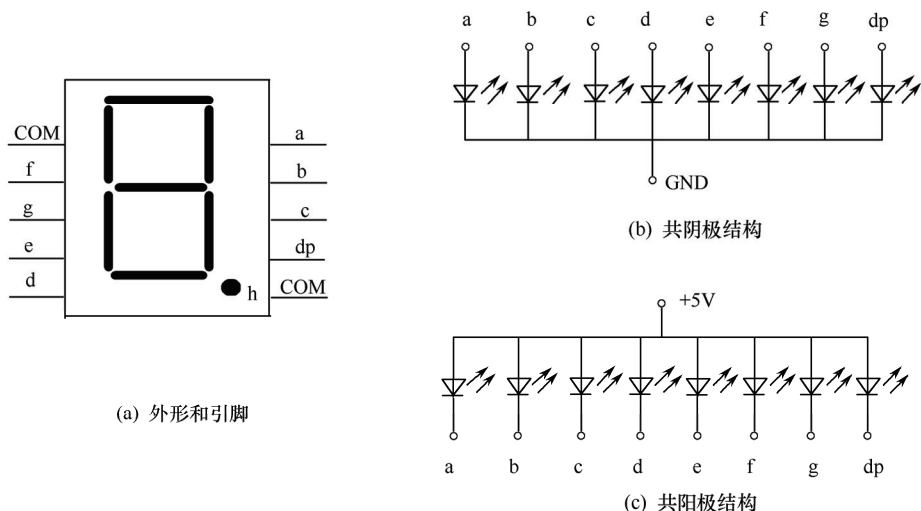


图 9.20 LED 数码管

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
dp	g	f	e	d	c	b	a

共阴极和共阳极的连接方式所需要显示的字形及所对应的段码见表 9.4。

表 9.4 共阴极和共阳极 LED 数码管字形与对应段码表

字形	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
共阴极码	3FH	06H	5BH	4FH	66H	6DH	7DH	07H	7FH	6FH
共阳极码	C0H	F9H	A4H	B0H	99H	92H	82H	F8H	80H	90H
字形	A	B	C	D	E	F	P	H	—	无显示
共阴极码	77H	7CH	39H	5EH	79H	71H	F3H	76H	40H	00H
共阳极码	88H	83H	C6H	A1H	86H	8EH	0CH	89H	BFH	FFH

为了使数码管显示不同的符号或数字，要把某些段发光二极管点亮，就要为 LED 数码管提供段码（字形码）。LED 数码管共计 8 段，正好是一个字节，习惯上是以“a”段对应段码字节的最低位。

### 3. 静态显示方式及其典型应用电路

LED 数码管显示可以分为静态显示和动态显示。

所谓动态显示就是动态循环扫描数码管，轮流依次点亮，无论在任何时刻只有一个 LED 数码管处于显示状态，即单片机利用余辉和人眼的“视觉暂留”作用，采用“扫描”方式控制各个数码管轮流显示。

静态显示则无位选信息，无论多少位 LED 数码管，同时处于显示状态，因此显示相比动态显示更清晰、亮度也更高。静态显示方式的软件编程较简单，一般适用于显示位数较少的场合。若用 I/O 口线接口，要占用多个 8 位 I/O 口。因此在显示位数较多的情况下，所需的电流比较大，对电源的要求也就随之增高。动态显示方式占用 I/O 端线少，电路较简单，编程较复杂，CPU 要定时扫描刷新显示，一般适用于显示位数较多的场合。

静态显示又可以分为并行扩展静态显示电路、串行扩展静态显示电路以及 BCD 码输出的静态显示电路。

#### (1) 并行扩展静态显示电路

并行扩展的 LED 静态显示电路如图 9.21 所示。图中有两个共阴极的显示数码管，每个数

码管都由一个 8 位的输出口控制，采用 P0 口扩展两片锁存器 74LS273，用来锁存两位共阴极 LED 的段码，采用静态扫描方式，同时也起到对数码管的驱动作用。因为是静态显示，因此较小的驱动电流就可以得到较高的显示亮度。单片机的写信号  $\overline{\text{WR}}$  和 P2.6、P2.7 共同控制对每片锁存器的数据的写入。

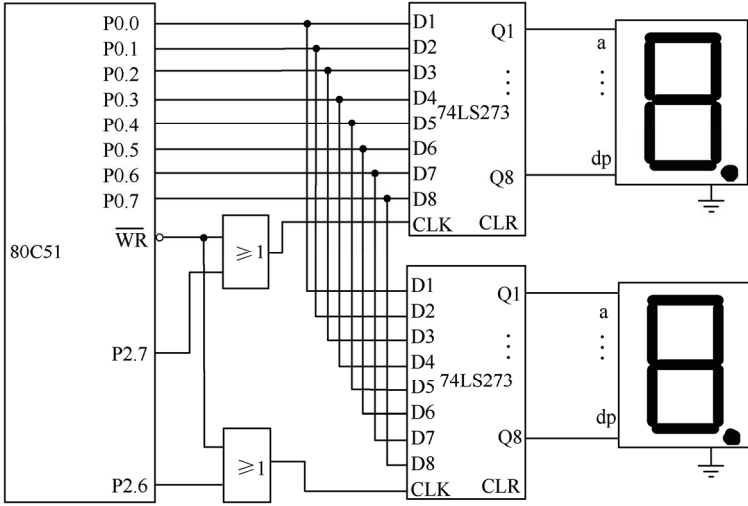


图 9.21 并行扩展的 LED 静态显示电路

【例 9.11】按图 9.21 编制显示子程序，两个数码管轮流交替显示 0~9 的数据。

```

ORG 0000H
AJMP MAIN
ORG 0030H
MAIN: MOV R2,#00H           ;主程序开始,显示“0”
KE1:  MOV A,R2
      MOV DPTR,#TAB         ;送 LED 显示首址
      MOVC A,@A+DPTR        ;查表求出键值显示的段码
      MOV DPTR,#7FFFH       ;选通第一片 74LS273
      MOVX @DPTR,A          ;数据送锁存器
      INC R2                ;显示下一个数
      MOV A,R2
      MOV DPTR,#TAB         ;送 LED 显示表首址
      MOVC A,@A+DPTR        ;查表求出键值显示的段码
      MOV DPTR,#0BFFFH      ;选通第二片 74LS273
      MOVX @DPTR,A          ;数据送锁存器
      LCALL LOOP1           ;调延时程序
      INC R2                ;显示下一个数
      CJNE R2,#0AH,KE1      ;判断显示完否
      AJMP MAIN
LOOP1: MOV R3,#0FFH         ;延时子程序
LOOP:  MOV R4,#0FFH
      DJNZ R4,$
      DJNZ R3,LOOP

```



```

RET
TAB:  DB  3FH,06H,5BH,4FH,66H,
      DB  6DH,7DH,07H,7FH,6FH           ;数字 0~9 的段码表
END

```

## (2) 串行扩展静态显示电路

图 9.21 中的并行扩展静态显示，如果显示的数码管位数较多的时候，所需要的锁存器的数量以及一些辅助的控制线也就增多。如果采用串行扩展的方式，就可以大大节省单片机的片数、减少电路板的体积。单片机本身具有 RS-232 串行输入和输出口，但是每个数码管若采用静态显示则仍需要并行的输入 I/O 口，因此需要一个串并的转换芯片。74HC164 就是一个串入并出的移位寄存器，可以实现串并的转换。

74HC164 的引脚说明：A，B 为串行输入口，Q0~Q7 为并行的输出口，CLR 端为清零端，CLK 为脉冲输入端。当 CLK 引脚来一个脉冲信号，则传送一位给输出端的最高位 Q0，同时输出端的信号从高位向低位依次移动一位。

用 74HC164 扩展静态显示数码管的连接电路如图 9.22 所示。74HC164 的输入口 A 和 B 并接在单片机的串口 RxD 端，RxD 端作为移位数据输出端。CLK 信号由单片机的 TxD 端和 P1.0 相与的结果来提供，TxD 端提供移位时钟信号，P1.0 则作为数码管允许控制信号线。

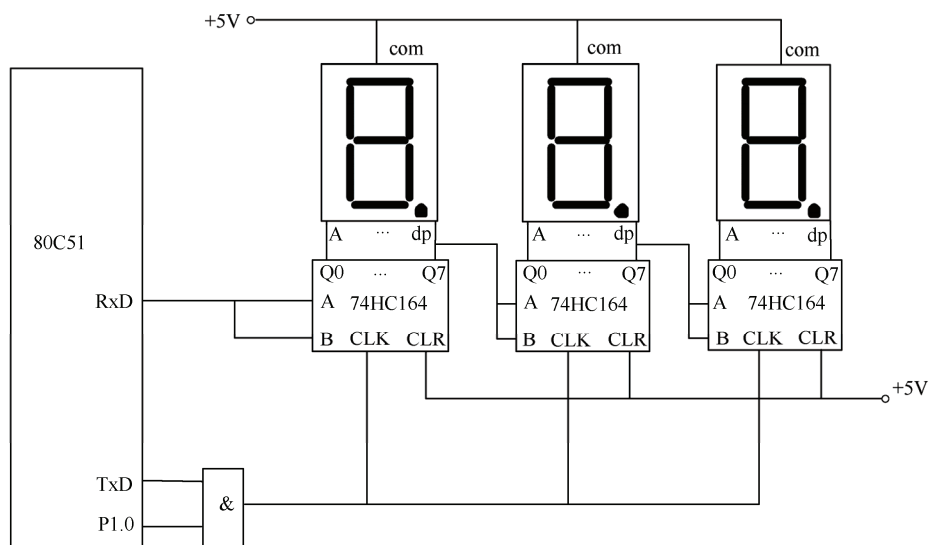


图 9.22 串行口静态显示电路

**【例 9.12】**按图 9.22 编制显示子程序，显示字段码从高位到低位依次存在片内 RAM 30H~32H 中。

```

DIR2:  MOV  SCON,#00H           ;置串口方式 0
        CLR  ES                 ;串口禁止中断
        SETB P1.0               ;“与”门开,允许 TxD 发移位脉冲
        MOV  SBUF,30H           ;串行输出个位显示字段码
        JNB  TI,$               ;等待串行发送完毕
        CLR  TI                 ;清串行中断标志
        MOV  SBUF,31H           ;串行输出十位显示字段码
        JNB  TI,$               ;等待串行发送完毕

```

CLR	TI	;清串行中断标志
MOV	SBUF,32H	;串行输出百位显示字段码
JNB	TI,\$	;等待串行发送完毕
CLR	TI	;清串行中断标志
CLR	P1.0	;“与”门关,禁止 TxD 发移位脉冲
RET		

对应的 C51 源程序如下:

```
void main()
{
    SCON=0x00      // 置串口方式 0
    ES=0x00        // 串口禁止中断
    P1^0= 1        // “与”门开,允许 TxD 发移位脉冲
    SBUF=0x30       // 串行输出个位显示字段码
    while(TI==0)    // 等待串行发送完毕
    TI=0            // 清串行中断标志
    SBUF=0x31       // 串行输出十位显示字段码
    while(TI==0)    // 等待串行发送完毕
    TI=0            // 清串行中断标志
    SBUF=0x32       // 串行输出百位显示字段码
    while(TI==0)    // 等待串行发送完毕
    P1^0=0          // 清串行中断标志
}
```

#### 4. 动态显示方式及其典型应用电路

在多位 LED 显示时,为简化硬件电路,通常将所有显示位的段码线的相应段并联在一起,由一个 8 位 I/O 口控制,而各位的共阳极或共阴极分别由相应的 I/O 线控制,形成各位的分时选通。采用动态的“扫描”显示方式。即在某一时刻,只让某一位的位选线处于选通状态,而其他各位的位选线处于关闭状态,同时,段码线上输出相应位要有显示的字符的段码。

虽然这些字符是在不同时刻出现的,而在同一时刻,只有一位显示,其他各位熄灭,由于余辉和人眼的“视觉暂留”作用,只要每位显示间隔足够短,则可以造成“多位同时亮”的假象,达到同时显示的效果。

LED 不同位显示的时间间隔(扫描间隔)应根据实际情况而定,特别是要兼顾亮度和效率。显示位数多,将占大量的单片机时间,因此动态显示的实质是以牺牲单片机时间来换取 I/O 端口的减少的。

图 9.23 所示为 8 个共阴极数码管的动态显示电路,数码管的相同段线并接在一起,和 P0 口相连。数码管的字位线则由 P2 口通过 8 个 NPN 三极管来提供。

**【例 9.13】**按图 9.23,定时器控制数码管动态显示年月日时分秒。

**解** 编程如下:

```
#include <reg51.h>
#include <intrins.h>
#define uchar unsigned char
#define uint unsigned int
```

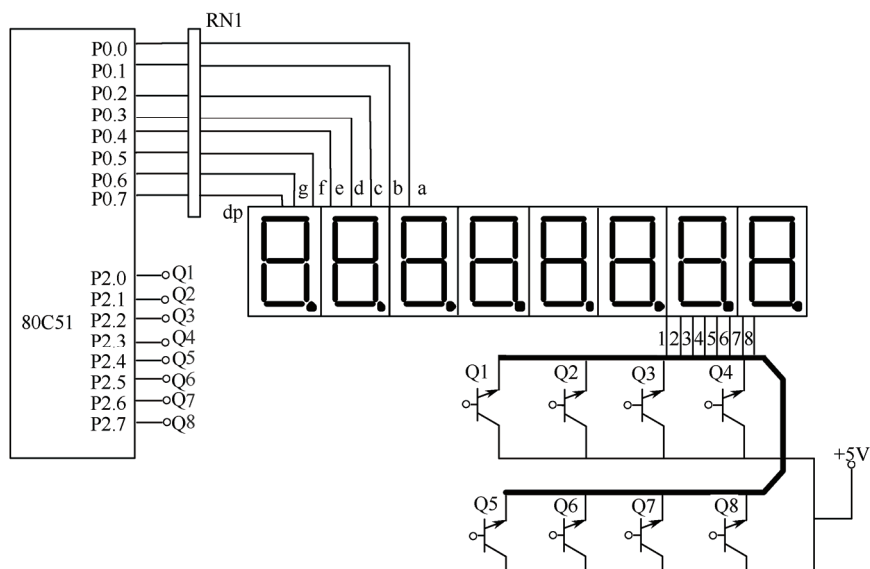


图 9.23 共阴极 8 位动态显示电路

```
// 段码, 最后一位是“-”的段码
uchar code
TIME_DONG[]={0xc0,0xf9,0xa4,0xb0,0x99,0x92,0x82,0xf8,0x80,0x90,0xbf};
// 待显示的数据: 14-12-04 与 21-48-58 (分两组显示)
uchar code Table_of_Digits[][8]={ {1,4,10,1,2,10,0,4}, {2,1,10,4,8,10,5,8} };
uchar i, j=0;
uint t=0;
// 主程序
void main()
{
    P2=0x80;                //位码初值
    TMOD=0x00;              //计数器 T0 方式 0
    TH0=(8192-4000)/32;     //4ms 定时
    TL0=(8192-4000)%32;
    IE=0x82;
    TR0=1;                  //启动 T0
    while(1);

    //T0 中断函数控制数码管刷新显示

    void TIME_DONG() interrupt 1
    {
        TH0=(8192-4000)/32; //恢复初值
        TL0=(8192-4000)%32;
        P0=0xff;            //输出位码和段码
        P0=TIME_DONG[Table_of_Digits[i][j]];
        P2=_crol_(P2,1);
        j=(j+1)%8;          //数组第 i 行的下一字节索引
    }
}
```

```

if(++t!=350) return;           //保持刷新一段时间
t=0;
i=(i+1)%2;                     //数组行 i=0 时显示年月日, i=1 时显示时分秒
}

```

【例 9.14】硬件电路如图 9.24 所示。利用 8155 的 A 口扩展了 8 个独立式按键，利用 PB 口、PA 口扩展了 6 位数码管，PB 口送段选码，PC 口送位选码。要求实现按键号的数码管显示。

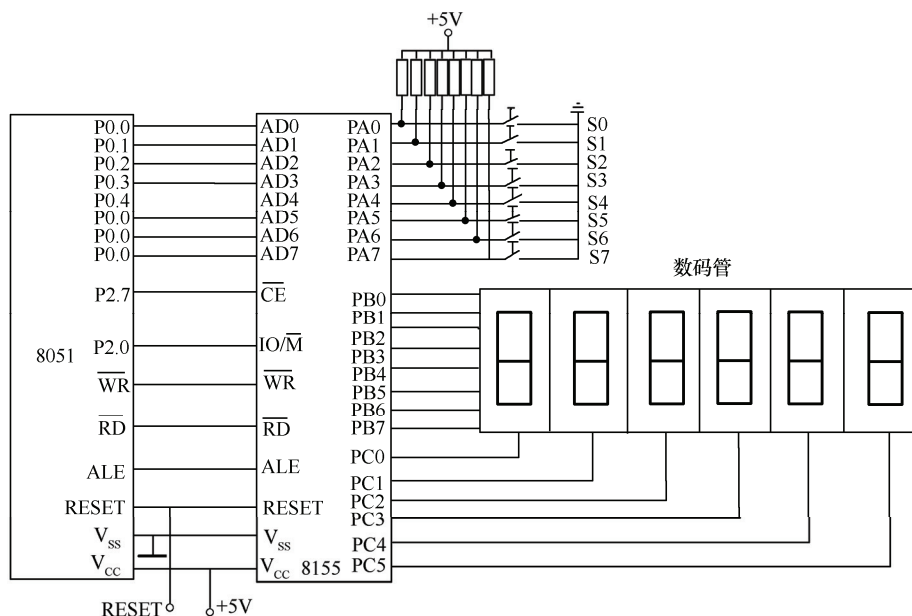


图 9.24 8155 扩展数码管应用电路图

**解** 资源分配：7F00H 为 8155 的命令字端口地址，7F01H 为 A 口地址，7F02H 为 B 口地址，7F03H 为 C 口地址，R3 为 LED 的显示个数，R2 为选通数据，R1 为键值，R4、R5 为延时参数。

程序：8155 控制的键盘显示

```

ORG 0000H
AJMP MAIN
ORG 0030H
MAIN: MOV DPTR,#7F00H    ;指向命令字端口地址
      MOV A,#0EH         ;设置 A 口为输入,B 口、C 口为输出
      MOVX @DPTR,A       ;送命令字
      MOV DPTR,#7F01H    ;指向 A 口地址
      MOVX A,@DPTR       ;读入 A 口的开关数据
      JNB ACC.0,KE0      ;判断是否“0”号键
      JNB ACC.1,KE1      ;判断是否“1”号键
      JNB ACC.2,KE2      ;判断是否“2”号键
      JNB ACC.3,KE3      ;判断是否“3”号键
      JNB ACC.4,KE4      ;判断是否“4”号键
      JNB ACC.5,KE5      ;判断是否“5”号键
      JNB ACC.6,KE6      ;判断是否“6”号键

```

	JNB	ACC.7,KE7	;判断是否“7”号键
	AJMP	MAIN	
GN:	MOV	R3,#06H	;设置 6 个 LED 显示
	MOV	R2,#0FEH	;选通第一位 LED 数据
GN1:	MOV	DPTR,#7F03H	;指向 C 口地址
	MOV	A,R2	;位选通数据送 R2 中保存
	MOVX	@DPTR,A	;送 C 口
	RL A		;选通下一位
	MOV	R2,A	;位选通数据送 R2 中保存
	MOV	A,R1	;取键值
	MOV	DPTR,#TAB	;送 LED 显示软件译码表首址
	MOVC	A,@A+DPTR	;查表求出键值显示的段码
	MOV	DPTR,#7F02H	;指向 B 口地址
	MOVX	@DPTR,A	;段码送显示
	LCALL	LOOP1	;调延时子程序
	DJNZ	R3,GN1	;循环显示 6 个 LED
	LJMP	MAIN	;返回主程序起始处
LOOP1:	MOV	R4,#08H	;延时子程序
LOOP:	MOV	R5,#0A0H	
	DJNZ	R5,\$	
	DJNZ	R4,LOOP	
	RET		
KE0:	MOV	R1,#00H	;用 R1 保存输入的“0”号键的键值
	LJMP	GN	
KE1:	MOV	R1,#01H	;用 R1 保存输入的“1”号键的键值
	LJMP	GN	
KE2:	MOV	R1,#02H	;用 R1 保存输入的“2”号键的键值
	LJMP	GN	
KE3:	MOV	R1,#03H	;用 R1 保存输入的“3”号键的键值
	LJMP	GN	
KE4:	MOV	R1,#04H	;用 R1 保存输入的“4”号键的键值
	LJMP	GN	
KE5:	MOV	R1,#05H	;用 R1 保存输入的“5”号键的键值
	LJMP	GN	
KE6:	MOV	R1,#06H	;用 R1 保存输入的“6”号键的键值
	LJMP	GN	
KE7:	MOV	R1,#07H	;用 R1 保存输入的“7”号键的键值
	LJMP	GN	
TAB:	DB	3FH,06H,5BH,4FH,66H,6DH,7DH,07H;	共阴极字形码表
	END		

## 9.6.2 LCD 液晶显示接口

LCD (Liquid Crystal Display, 液晶显示器) 被动显示, 本身并不发光, 是利用液晶经过处

理后能改变光线通过方向的特性，从而达到显示的目的。液晶显示器具有省电、抗干扰能力强等优点，广泛应用在智能仪器仪表和单片机测控系统中。

段码型液晶模块是由数显液晶显示器件和集成电路组装而成的，它的价格低廉，显示字迹清晰，但它只能进行数字的简单显示，其显示形式和使用均类似于 LED 显示器，已广泛用于电子表、计算器、数字仪表中。

点阵字符液晶模块是由点阵字符液晶显示器和专用驱动器、控制器、结构件装配而成的。它可以显示数字和英文字符，本身具有字符发生器，显示容量要大于段码型液晶显示模块，广泛应用在各类单片机应用系统中。

点阵图形液晶显示模块的特点是点阵像素连续排列，因此可以显示连续、完整的图形，也可以显示数字及中文汉字，可以实现屏幕的上下左右滚动及动画等功能。它是功能最全面而控制相对也要复杂些的显示器，广泛用于笔记本电脑、彩色电视和游戏机等。

下面以点阵式液晶显示器 MGLS12864 模块为例来介绍点阵图形液晶显示模块。

### 1. MGLS12864 液晶显示模块的内部结构与引脚功能

图 9.25 所示为 MGLS12864 液晶显示模块逻辑框图。该模块为 128×64 的点阵，内部使用 3 片驱动集成芯片。其中两片 KS0108B(或其兼容控制器 HD61202)作为列驱动器，一片 KS0107B(或其兼容芯片 HD61203)作为行驱动器。KS0108B 芯片具有内置 64 位×64 位的显示存储器，显示存储器的每位数据与显示屏上各像素点的明暗状态一一对应，显示存储器的数据直接作为图形显示的驱动信号。当某二进制位为“1”时，相应的像素点被点亮；为“0”时，相应的像素点不显示。

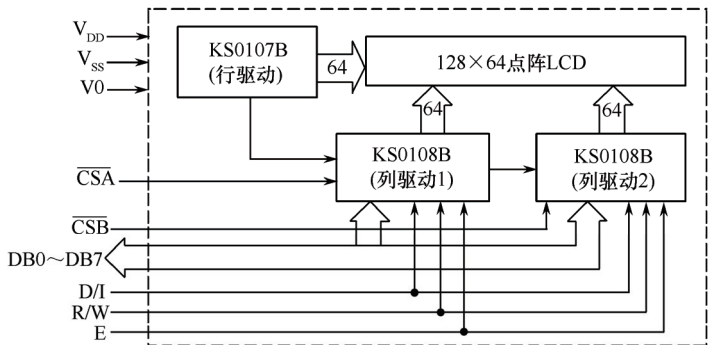


图 9.25 MGLS12864 液晶显示模块逻辑框图

MGLS12864液晶显示模块引脚说明：

$\overline{CSA}$ 、 $\overline{CSB}$  分别为片选 1 和片选 2，两位取 01 时选择列驱动芯片 1，取 10 时选择列驱动芯片 2。

V0：对比度调节，电压变化范围为-10~0V（视不同型号）。

D/I：指令、数据通道选择。为 1 时：数据操作；为 0 时：指令操作。

R/W：读/写选择。为 1 时：读操作；为 0 时：写操作。

E：使能信号，高电平时读出数据，下降沿时写入数据。

DB0~DB7：数据线。

LED+：LED 背光正电源端。底背光： $V < 4.0V$ ；边背光： $V \leq 4.1V$ 。

LED-：LED 背光接地端。

VSS：数字地；VDD：逻辑电源+5V。

## 2. KS0108B 列驱动器内部的 RAM 地址结构

驱动芯片 KS0108B 内部有 4096 (64×64) 位显示数据存储单元，即 64 行、64 列，每位 RAM 中数据信息对应 LCD 屏上一个点的状态信息。KS0108B 芯片显示 RAM 的地址结构见表 9.5。存储器被分为 8 页、64 列，每页对应显示屏点阵的 8 行。显示器上每 8 点对应 RAM 中一字节数据，单片机写入或读出显示存储器的数据，代表显示屏上某一点列方向上垂直 8 点的数据。DB0 代表某页最上一行的点数据，DB1 为第二行的点数据，……，DB7 为第八行的点数据。

表 9.5 KS0108B 芯片显示 RAM 的地址结构

页地址	列地址						行地址
	0	2	3	...	62	63	
0	DB0	DB0	DB0	...	DB0	DB0	0
	...	...	...	...	...	...	...
	DB7	DB7	DB7	...	DB7	DB7	7
1	DB0	DB0	DB0	...	DB0	DB0	8
	...	...	...	...	...	...	...
	DB7	DB7	DB7	...	DB7	DB7	15
...	...						...
7	DB0	DB0	DB0	...	DB0	DB0	56
	...	...	...	...	...	...	...
	DB7	DB7	DB7	...	DB7	DB7	63

## 3. 液晶显示模块指令系统

液晶控制器 KS0108B 共有 7 条指令，从作用上可分为两类：显示状态设置指令和数据读/写操作指令，数据线 DB 每一位的定义以及 R/W 和 D/I 对应的状态分别介绍如下。

显示开/关指令格式：

R/W	D/I	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1/0

当 DB0=1 时，LCD 显示 RAM 中的内容；当 DB0=0 时，关闭显示。

显示起始行设置指令格式：

R/W	D/I	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
0	0	1	1	显示起始行号 (0~63)					

页设置命令格式：

R/W	D/I	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
0	0	1	0	1	1	1	页号 (0~7)		

列地址设置命令格式：

R/W	D/I	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
0	0	0	1	显示列地址 (0~63)					

读状态指令格式：

R/W	D/I	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
1	0	BUSY	0	ON/OFF	RESET	0	0	0	0

读状态指令用来查询液晶显示模块内部控制器的工作状态，各参量意义如下：

BUSY：该位为 1，表示显示屏在工作；该位为 0，表示显示屏处于空闲状态。

ON/OFF：该位为 1，显示屏关闭；该位为 0，显示器屏打开。

RESET：该位为 1，处于复位状态；该位为 0，处于正常状态。

在 BUSY 和 RESET 为 1 状态时，除可进行读指令操作外，其他指令均不对液晶显示模块产生作用。

写数据指令格式：

R/W	D/I	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
0	1	待写数据							

读数据指令格式：

R/W	D/I	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
1	1	读显示数据							

读/写数据指令每执行一次读或写操作，列地址就自动加“1”。在进行读操作之前，必须先有一次空读操作，再读时才能读出所需读单元中的数据。

4. 单片机与液晶显示模块接口电路

液晶显示模块与 MCS-51 单片机有两种接口方式：直接访问方式和间接控制方式。所谓直接访问就是将液晶显示模块的接口作为存储器或者 I/O 口设备直接挂在单片机总线上，单片机以访问存储器或 I/O 口设备的方式对液晶显示模块进行操作。间接控制方式是通过单片机自身或者系统扩展的并行接口与液晶显示模块相连接，如 80C51 的 P1 口、P3 口，或接口芯片 81C55，单片机通过对这些接口芯片的操作，达到对液晶显示模块的控制。下面分别给出直接访问方式和间接控制方式的连接图。图 9.26 所示为直接访问方式连接电路图，图 9.27 所示为间接控制方式连接电路。

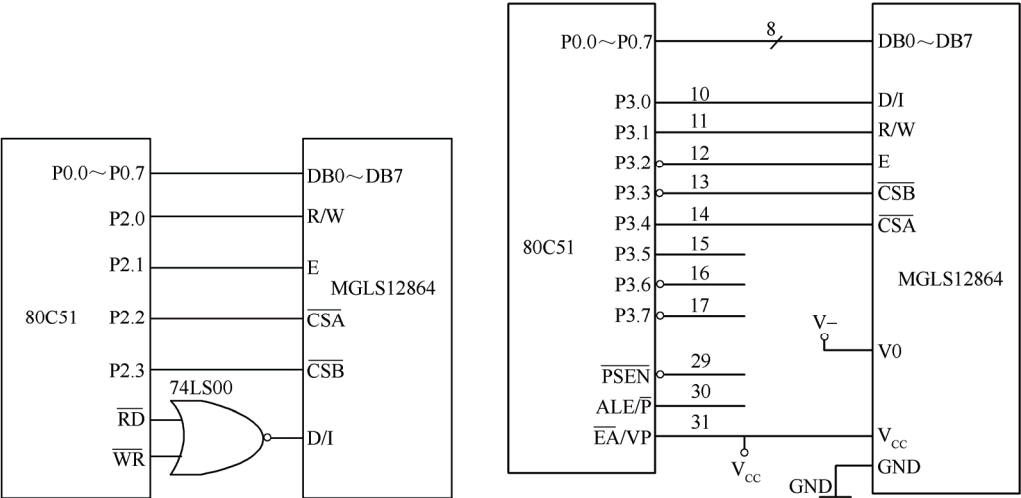


图 9.26 液晶显示模块直接访问方式连接电路

图 9.27 液晶显示模块间接控制方式连接电路

由于直接访问方式的程序编写与访问片外存储器和 I/O 口的方式相同，在此不再介绍。下面以间接控制的方式为例来介绍程序的编写。通常情况下，液晶模块生产厂家会提供相应的驱动程序，这里引用了清华蓬远科贸公司液晶驱动器的驱动程序。MGLS12864 液晶显示模块的列驱动有左、右两块芯片电路，分别对应显示器的左、右两部分区域，因此编写显示驱动程序时也分左、右两部分。下面以左驱动芯片的程序为例来进行说明。



左边区域驱动程序包含写指令、写数据、读数据 3 个子程序。

(1) 左边区域写指令子程序

COM EQU 50H	;指令码寄存器
DAT1 EQU 51H	;数据寄存器
WLCOM: CLR P3.4	;CSA=0
SETB P3.3	;CSB=1,选中左芯片
CLR P3.0	;D/I=0,进行指令操作
SETB P3.1	;R/W=1,进行读操作
WLCOM1: MOV P0,#0FFH	;P0 口置“1”
SETB P3.2	;E=1,芯片使能有效
MOV A,P0	;读状态字
CLR P3.2	;E=0,芯片使能无效
JB ACC.7,WLCOM1	;该位为“1”表示“忙”,再重读
CLR P3.1	;R/W=0,芯片写选通
MOV P0,COM	;写指令代码
SETB P3.2	;E=1
CLR P3.2	;E=0
RET	

(2) 左边区域写数据子程序

WL DAT: CLR P3.4	;CSA=0
SETB P3.3	;CSB=1,选中左芯片
CLR P3.0	;D/I=0,进行指令操作
SETB P3.1	;R/W=1,进行读操作
WL DAT1: MOV P0,#0FFH	;P0 口置“1”
SETB P3.2	;E=1,芯片使能有效
MOV A,P0	;读状态字
CLR P3.2	;E=0,芯片使能无效
JB ACC.7,WL DAT1	;该位为“1”表示“忙”,再重读
SETB P3.0	;D/I=1,进行数据操作
CLR P3.1	;R/W=0,芯片写选通
MOV P0,DAT1	;写数据
SETB P3.2	;E=1,芯片使能有效
CLR P3.2	;E=0,芯片使能无效
RET	

(3) 读左区数据子程序

RL DAT: CLR P3.4	;CSA=0
SETB P3.3	;CSB=1,选中左芯片
CLR P3.0	;D/I=0,进行指令操作
SETB P3.1	;R/W=1,进行读操作
RL DAT1: MOV P0,#0FFH	;P0 口置“1”
SETB P3.2	;E=1,芯片使能有效
MOV A,P0	;读状态字
CLR P3.2	;E=0,芯片使能无效

JB ACC.7,RLDAT1	;该位为“1”表示“忙”,再重读
SETB P3.0	;D/I=1,进行数据操作
MOV P0,#0FFH	;P0 口置“1”
SETB P3.2	;E=1,芯片使能有效
MOV DAT1,P0	;读数据
CLR P3.2	;E=0,芯片使能无效
RET	

右边区域驱动程序也一样包括写指令、写数据、读数据 3 个子程序,读者可以仿照左边区域驱动程序来编写,在此不再重复。

#### (4) 初始化子程序 INT

初始化子程序完成显示起始行的设置并打开显示器开始工作。

INT: MOV COM,#0C0H	;设置显示起始行为第一行
LCALL WLCOM	;调用左边区域写指令子程序
LCALL WRCOM	;调用右边区域写指令子程序
MOV COM,#3FH	;开启显示
LCALL WLCOM	;左区开显示
LCALL WRCOM	;右区开显示
RET	

#### (5) 清显示数据存储区(清屏)子程序

该程序用于将显示模块数据存储区全部清 0。屏幕左、右区存储区均分成 8 个页面,每页有 64 字节。

CLEAR: MOV R7,#00H	;页面地址暂存器设置
CLEAR1: MOV A,R7	
ORL A,#0B8H	;“或”页面地址设置代码,形成 0 页地址
MOV COM,A	;页面地址设置
LCALL WLCOM	;写入左区
LCALL WRCOM	;写入右区
MOV COM,#40H	;初始列地址设置为“0”
LCALL WLCOM	;写入左区
LCALL WRCOM	;写入右区
MOV R3,#40H	;一页清 64 字节
CLEAR2: MOV DAT1,#00H	;显示数据为“0”
LCALL WLDAT	;左区清 0
LCALL WRDAT	;右区清 0
DJNZ R3,CLEAR2	;页内 64 字节没清完继续
INC R7	;页地址暂存器加 1,清下一页
CJNE R7,#08H,CLEAR1	;8 页 RAM 区清完退出,否则继续
RET	

### 5. 液晶显示模块显示汉字编程

利用液晶显示来显示汉字,我们需要做到了解液晶显示模块的工作原理。液晶显示模块不具备字符库,那么就需要确定存放的字符,理解液晶显示驱动的各种指令。下面介绍编写一个汉字显示的程序。定义每个汉字为 16×16 点阵模式,占用 32 字节的连续内存空间。

**【例 9.15】**根据图 9.28,要求在 LCD 上分两行交替显示“测试开始”和“测试完毕”字样,试编写程序。

9.6.3 键盘接口

键盘具有向单片机输入数据、命令等功能，是人与单片机对话的主要手段。下面介绍键盘的工作原理和键盘的工作方式。按其结构形式可分为非编码键盘和编码键盘。

编码键盘是键盘本身能够产生按键的键值，每按下一个键，键盘能自动生成键盘代码，这种键盘的键数较多，且自带有去抖动功能，使用方便，但硬件较复杂，PC 配备的键盘就是采用这种编码键盘。非编码键盘则仅提供按键开关，每个按键的键码由电路板设计者自行决定，这种键盘键数较少，硬件简单，广泛应用于各种单片机应用系统，因此下面主要介绍非编码键盘的设计与应用。

对于非编码键盘，需要处理按键抖动问题，如图 9.29 所示。按键实质上就是一个开关，如图 9.29 (a) 所示，通过键盘开关机械触点的断开、闭合，其电压输出波形如图 9.29 (b) 所示。按键的抖动时间一般为 5~10ms，抖动现象会引起 CPU 对一次按键的多次误操作。按键抖动有两种方式：一种是硬件消抖，采用专用的键盘接口芯片，这类芯片中都有自动去抖动的硬件电路。

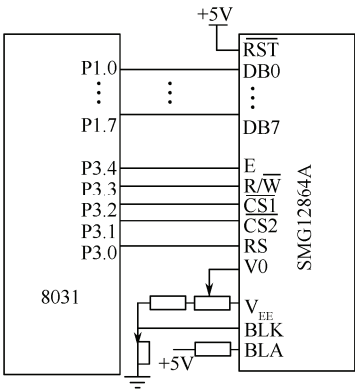


图 9.28 单片机和液晶接口电路

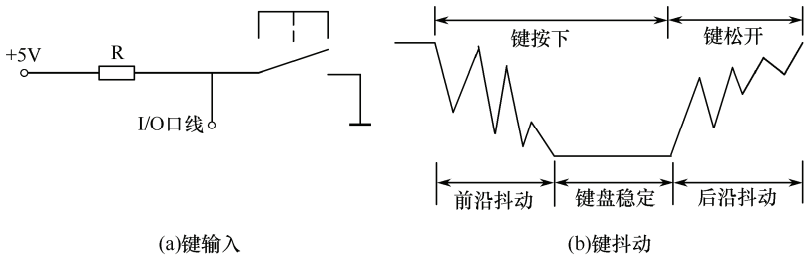


图 9.29 按键电路及按键抖动

硬件消抖电路如图9.30所示。在这几种硬件消抖电路中，RC滤波去抖动的电路简单实用，效果最好。

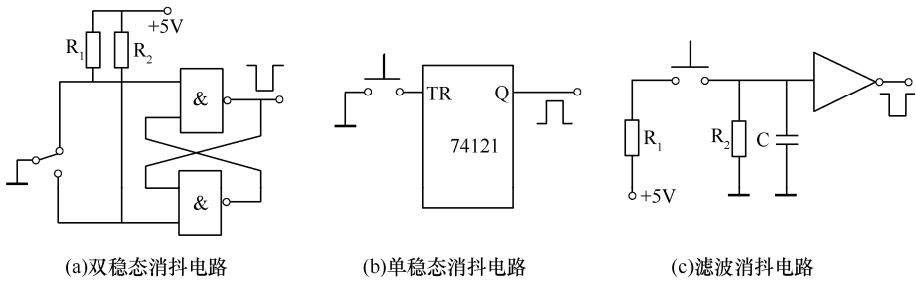


图 9.30 常用的硬件消抖电路

在检测到有键按下时，执行一段延时 10ms 的子程序后，确认该按键电平是否仍为低电平，如果仍为低电平，则确认该行确实有键按下。当按键松开时，低电平变为高电平，执行一段延时 10ms 的子程序后，检测该行线为高电平，说明按键确实已经松开。采取本措施，可消除两个抖动期的影响。

按照键盘与单片机的连接方式可分为独立式键盘和矩阵式键盘两种。

## 1. 独立式键盘及其接口电路

### (1) 按键直接与单片机的 I/O 口连接

独立式键盘是由若干个机械触点开关构成的，把它与单片机的 I/O 口线连起来，通过读 I/O 口的电平状态，即可识别出相应的按键是否被按下。但如果按键数目较多，则要占用较多的 I/O 口线。

**【例 9.16】**根据图 9.31 (a)、(b) 所连接的电路图，编写按键扫描子程序。

**解** 以图9.31 (a) 为例进行程序的编程。

```
#include <reg51.h>
void keyscan(void)
{
    unsigned char key;
    do
    {
        P1 = 0xff;           //P1 口为输入
        key = P1;
        key = ~key;
        switch(key)
        {
            case 1:.....;    //处理按键 K1
            break;            //跳出 switch 语句
            case 2: .....;    //处理按键 K2
            break;
            case 3:.....;    //处理按键 K3
            break;
            case 4:.....;    //处理按键 K4
            break;
        }
    }
    while(1);
}
```

图9.31 (b) 的编程可以仿照图9.31 (a) 的程序来进行。

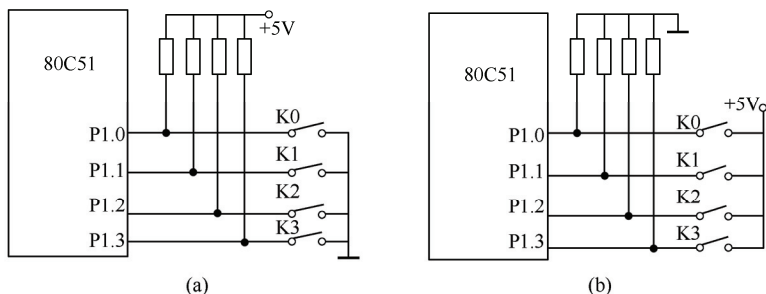


图 9.31 独立式按键接口电路

## (2) 按键与单片机的扩展 I/O 口连接

如图 9.32 所示, 此时按键通过 74LS373 芯片与单片机相连接, 由于 74LS373 内没有上拉电阻, 所以在外接按键时需要接上拉电阻。电路中所接的电容也起到一定的按键消抖作用。

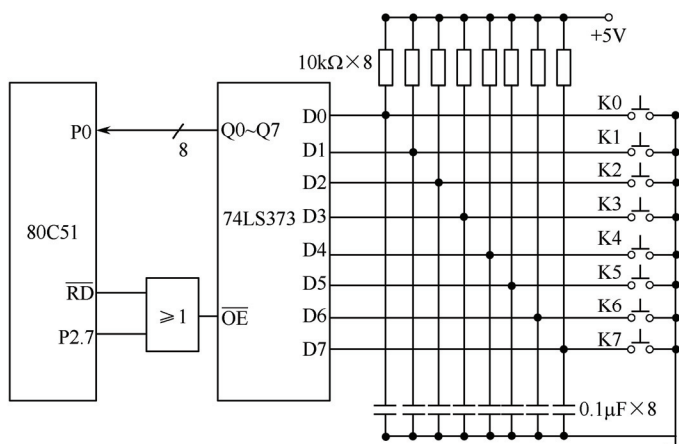


图 9.32 按键与并行扩展 I/O 口连接电路

## 2. 矩阵式键盘及其接口电路

矩阵式键盘用于按键数目较多的场合, 由行线和列线组成, 按键位于行、列的交叉点上。如图 9.33 所示, 一个 4×4 的行、列结构可以构成一个 16 个按键键盘。在按键数目较多的场合, 能节省较多的 I/O 口线。

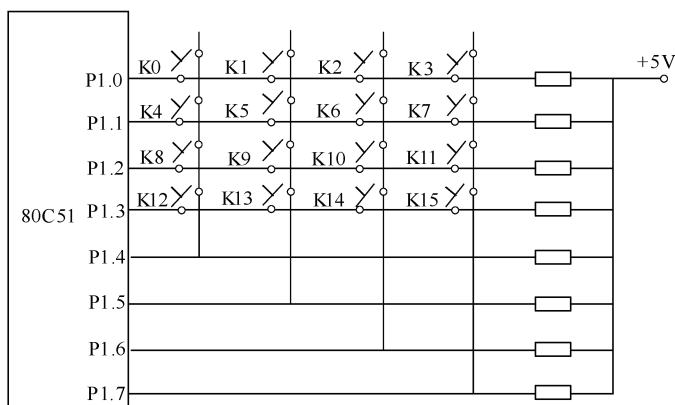


图 9.33 矩阵式键盘的结构

矩阵中无按键按下时, 行线为高电平; 当有按键按下时, 行线电平状态将由与此行线相连的列线的电平决定。列线的电平如果为低, 则行线电平为低; 列线的电平如果为高, 则行线的电平也为高, 这是识别按键是否按下的关键所在。

矩阵式键盘有以下几种扫描工作方式。

### (1) 程序扫描方式

这种扫描方式也称查询方式, 其特点是: 利用单片机空闲时, 调用键盘扫描子程序, 反复扫描键盘。如果单片机的查询的频率过高, 虽能及时响应键盘的输入, 但也会影响其他任务的进行。查询的频率过低, 可能会产生键盘输入漏判。

### (2) 定时控制扫描方式

每隔一定的时间对键盘扫描一次。通常利用单片机内的定时器, 定时来对键盘进行扫描,

在有键按下时识别出该键，并执行相应键的处理程序。为了不漏判有效的按键，定时的周期一般应小于 100ms。

### (3) 中断控制方式

键盘只有在有按键按下时，发出中断请求信号，单片机响应中断，执行键盘扫描程序中中断服务子程序。如无键按下，单片机将不理睬键盘。此种方式的优点是只有按键按下时，才进行处理，所以其实时性强，工作效率高。

**【例 9.17】**按图 9.33 所示的矩阵式键盘结构图，试编制程序，该键盘按程序扫描控制方式。

**解** 程序编写思路如下：

假设键5被按下。

第一步，P1.0~P1.3 输出全为“0”，然后读入 P1.4~P1.7 线的状态，结果 P1.5=0，而 P1.4、P1.6、P1.7 均为 1，因此，第 2 行出现电平的变化，说明第 2 行有键按下；

第二步，让 P1.4~P1.7 输出全为“0”，然后读入 P1.0~P1.3 线的状态，结果 P1.1=0，而 P1.0、P1.2、P1.3 均为 1，因此第 4 列出现电平的变化，说明第 4 列有键按下。

综上所述，即第 2 行、第 2 列按键被按下，此按键即键 5 按下。这种程序行列扫描的方法简单适用，但不要忘记按键去抖动处理。

程序编写如下：

```

        CLR    FO                ;设置FO为0,为未去抖标志
KEY:    MOV     P1,#0F0H        ;行线置低电平,列线置输入状态
KEY0:   MOV     A,P1            ;读列线数据
        CPL     A                ;数据取反,“1”有效
        ANL     A,#0F0H        ;屏蔽行线,保留列线数据
        MOV     R1,A            ;存列线数据(R1高4位)
        JZ      GRET            ;全0,无键按下,返回
KEY1:   MOV     P1,#0FH        ;行线置输入态,列线置低电平
        MOV     A,P1            ;读行线数据
        CPL     A                ;数据取反,“1”有效
        ANL     A,#0FH        ;屏蔽列线,保留行线数据
        MOV     R2,A            ;存行线数据(R2低4位)
        JZ      GRET            ;全0,无键按下,返回
        JBC     F0,WAIT        ;已有消抖标志,转至等待按键释放
        SETB    F0              ;无消抖标志,置消抖标志
        LCALL   DY10ms         ;调用10ms延时子程序,消抖
        SJMP    KEY0           ;重读行线列线数据
GRET:   RET
WAIT:   MOV     A,P1            ;等待按键释放
        CPL     A
        ANL     A,#0FH
        JNZ     WAIT           ;按键未释放,继续等待
KEY2:   MOV     A,R1            ;取列线数据(高4位)
        MOV     R1,#03H        ;取列线编号初值
        MOV     R3,#03H        ;置循环数

```

	CLR	C	
KEY3:	RLC	A	;依次左移入C中
	JC	KEY4	;C=1,该列有键按下(列线编号存R1)
	DEC	R1	;C=0,无键按下,修正列编号
	DJNZ	R3,KEY3	;判断循环是否结束?未结束继续寻找有键按下的列线
KEY4:	MOV	A,R2	;取行线数据(低4位)
	MOV	R2,#00H	;置行线编号初值
	MOV	R3,#03H	;置循环数
	CLR	C	
KEY5:	RRC	A	;依次右移入C中
	JC	KEY6	;C=1,该行有键按下(行线编号存R2)
	INC	R2	;C=0,无键按下,修正行线编号
	DJNZ	R3,KEY5	;判循环结束否?未结束继续寻找有键按下的行线
KEY6:	MOV	A,R2	;取行线编号
	CLR	C	
	RLC	A	;行编号×2
	RLC	A	;行编号×4
	ADD	A,R1	;行编号×4+列编号=按键编号
KEY7:	CLR	C	
	RLC	A	;按键编号×2
	RLC	A	;按键编号×4(LCALL+RET共4字节)
	MOV	DPTR,#TABJ	
	JMP	@A+DPTR	;散转,执行相应键功能子程序
TABJ:	LCALL	WORK0	;调用执行0#键功能子程序
	RET		
	LCALL	WORK1	;调用执行1#键功能子程序
	RET		
	...		
	LCALL	WORK15	;调用执行15#键功能子程序
	RET		

采用中断的方式能够提高单片机扫描键盘的效率,但是在硬件电路的连接上也会不一样,如图 9.34 所示。把行线信号连接到与门,只要行线中有任意一根线出现低电平就会向单片机申请中断。

**【例 9.18】**按图 9.34 所示的连接图,试编制中断方式键盘扫描程序,将键盘中的按键码存入片内 RAM 30H 单元中。

**解** 编程思路分析:只有在键盘有按键按下时,才发出中断请求信号,单片机响应中断,执行键盘扫描程序中断服务子程序。如无键按下,单片机将不响应键盘。

此种方式的优点是,只有按键按下时,才进行处理,所以其实时性强,工作效率高。

当进入中断后,按键识别的过程与例 9.17 一样。

参考程序在“程序附件”中,请登录华信教育资源网 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn) 下载。

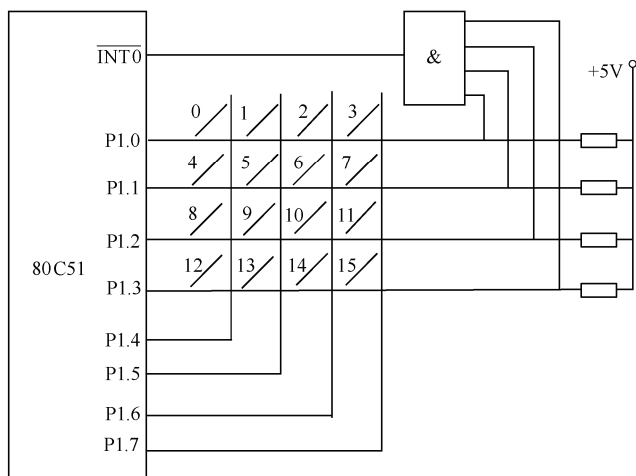


图 9.34 工作于中断方式的矩阵式键盘接口电路

## 本章小结

51 单片机的片内外资源有限，MCS-51 有 4 个 I/O 口 P0~P3，真正用作 I/O 口线的只有 P1 口的 8 位 I/O 口线和 P3 口的某些位线。因此，大多需要外部 I/O 接口的扩展。对于一些应用系统来说，为了降低使用单片机的片数，还需要对系统进行一些扩展，也就是说需要增加一些输入和输出外部设备，从而来加强单片机的硬件资源，扩大应用范围。

在应用系统的扩展中，首先是对于存储器的扩展。由于介绍的 MCS-51 系列单片机的地址总线为 16 位，因此外扩的程序存储器和数据存储器的最大容量均为 64KB。虽然程序存储器和数据存储器的地址编址是重叠的，但是由于它们所使用的控制线不同，访问它们的操作码也不一样，因此不会出现混乱。扩展的连接方式上介绍了线选法和全地址译码两种方法。目前超大规模集成电路制造工艺的发展，芯片的集成度越来越高，单片存储器的容量越来越大，因此芯片的选择大多可以采用电路连接更加简单的线选连接方式。

本章介绍了 MCS-51 与两种常用的可编程 I/O 接口芯片 82C55 和 81C55 的扩展接口设计。此外，还介绍了使用廉价的 74LS TTL 芯片扩展并行 I/O 接口以及用 MCS-51 串行口来扩展并行 I/O 接口的设计。81C55 和 82C55 可编程 I/O 口芯片也是系统 I/O 扩展中应用较多的芯片，它们与单片机的连接电路非常简单，可以根据连接电路利用软件编程来定义扩展的输入/输出口。

键盘和显示器的扩展也是单片机应用系统中最常出现的外设，显示器有数码管显示和液晶显示两种，显示的方式上有动态显示和静态显示两种。键盘的连接方式也可以根据按键的个数及应用系统中的接口资源来确定。

## 思考题及习题

- 9.1 在一般情况下实现片选的方法有两种，分别是\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。
- 9.2 系统扩展的基本方法是什么？
- 9.3 11根地址线可选\_\_\_\_\_（或2KB）个存储单元，16KB存储单元需要\_\_\_\_\_根地址线。
- 9.4 MCS-51单片机的扩展能力如何？对片外程序存储器和数据存储器的操作为什么允许两者的地址空间重叠？



9.10 计算机对输入/输出设备的控制方式主要有3种。其中，A方式硬件设计最简单，但要占用不少CPU的运行时间；B方式的硬件线路最复杂，但可大大提高数据传送效率；而C则介于上述两者之间。

- ①先进先出      ②后进先出      ③直接存储器访问      ④程序查询  
⑤高速缓存      ⑥系统总线      ⑦程序中断      ⑧逐行扫描

B=\_\_\_\_\_, C=\_\_\_\_\_。

9.12 LED 数码管根据二极管的连接方式可以分为 和 两大类。

9.13 I/O 口数据传送有哪些传送方式？分别在哪些场合下应用？

### 9.14 为什么要消除按键的机械抖动？消除按键的机械抖动的方法有哪几种？原理是什么？

9.15 说明矩阵式键盘按键按下的识别原理。

9.16 根据图 9.35 的电路, 把 81C55 的 PA 口和 PC 口设置成输入方式, PB 口设置成输出方式, 定时器作为方波发生器, 对输入的脉冲进行 24 分频。试写出满足此要求的初始化程序。

9.17 如图 9.36 所示, 完成下面的任务: (1) 指出图中 2764-1 的地址范围; (2) 外部扩展程序存储器容量共多少? (3) 编写将程序存储器中 1000H 的内容读出到寄存器 A 中的程序段。

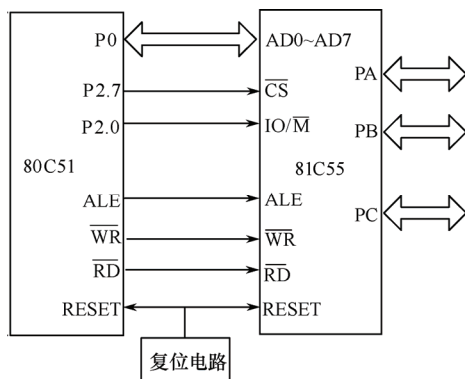


图 9.35 题 9.16 图

9.15 说明矩阵式键盘按键按下的识别原理。

9.16 根据图 9.35 的电路, 把 81C55 的 PA 口和 PC 口设置成输入方式, PB 口设置成输出方式, 定时器作为方波发生器, 对输入的脉冲进行 24 分频。试写出满足此要求的初始化程序。

9.17 如图 9.36 所示, 完成下面的任务: (1) 指出图中 2764-1 的地址范围; (2) 外部扩展程序存储器容量共多少? (3) 编写将程序存储器中 1000H 的内容读出到寄存器 A 中的程序段。

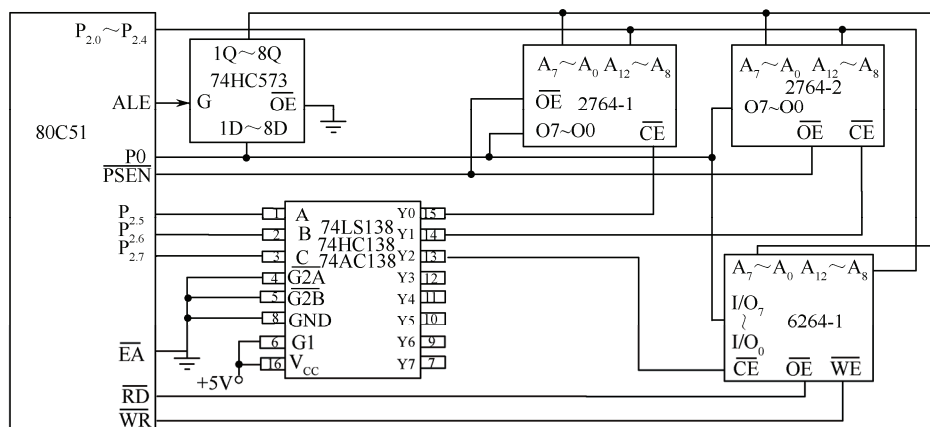


图 9.36 题 9.17 图

9.18 设 8051 系统分配给 8255A 的基地址为 EC00H。编写程序段：初始化 8255A，命其 A 口为方式 0 输出，C 口高 4 位为输入；B 口为方式 1 输入，C 口低 4 位为输入；将 A 口的高 4 位置 1，低 4 位清 0；将 B 口的输入状态读入寄存器 A；将 C 口的状态读入寄存器 A 后，再将(A)的低 3 位清 0，高 5 位不变。

## 第 10 章 80C51 单片机的模拟量接口

在单片机测量与控制系统中，有许多测量的物理量随时间连续变化，我们把这些量称为模拟量，如温度、压力、流量、速度等，须经传感器先转换为模拟电信号，然后必须转换成数字量后才能单片机中用软件进行处理。模拟量转换成数字量的器件称为 A/D 转换器（ADC）。单片机处理完毕的数字量，有时需转换为模拟信号输出，这样的器件称为 D/A 转换器（DAC）。

图 10.1 是一个简单的电机速度控制系统方框图。电机内的转速传感器把电机的转速转换成电压信号后经过跨阻放大器转换成电压，再经过模数转换变成数字量输入到处理器，处理器根据当前的转速设定值作出判断，改变输出数字量的大小，数模转换部分输出电压信号，经过驱动器后控制电机的转速。

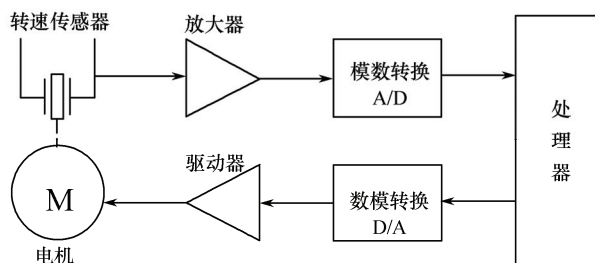


图 10.1 转速控制系统

本章主要介绍 D/A 和 A/D 转换的基本原理，以及典型的 ADC、DAC 集成电路芯片，选择和使用模拟器件时需要注意的器件参数，并通过几个具体器件的应用举例来分析单片机模拟量接口的设计方法。

### 10.1 并行 D/A 转换器与单片机的接口

#### 10.1.1 D/A 转换原理

在 D/A（Digital to Analog）转换的目的是把输入的数字量用二进制代码按数位组合起来，每一位码都能按照一定的比例关系转换成与之对应的模拟量，然后将这些模拟量相加，即可得到与数字量成正比的总的模拟量，从而实现数模转换。如图 10.2 所示。

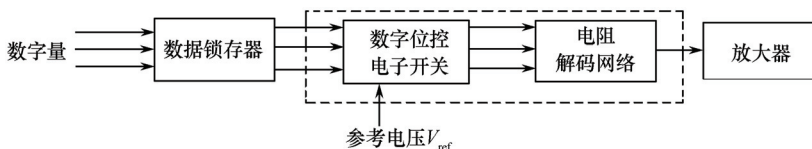


图 10.2 D/A 转换示意图

在目前的 DAC 器件中，常用的是输出模拟电压。假如输入的是一个  $n$  位二进制数  $D[n-1:0]$ ，输出电压为  $V_{out}$ ，则它们之间的关系为

$$V_{out} = C(D_{n-1} \times 2^{n-1} + \dots + D_2 \times 2^2 + D_1 \times 2^1 + D_0 \times 2^0)$$

其中， $C$  为一个常数，具体值根据不同的器件而定。

尽管数字量有利于计算机的输入和输出，但工业控制系统中仍然有许多控制接口沿用模拟量控制，例如控制异步电动机的变频器就一直保留有模拟量输入接口。因此，D/A 转换芯片的学习和掌握仍然十分重要。

使用 D/A 时要注意区分以下两个问题。

#### (1) D/A 转换器的两种输出形式

两种输出形式：电压输出形式与电流输出形式。电流输出的 D/A 转换器，如需模拟电压输出，可在其输出端加一个 I/V 转换电路。

#### (2) D/A 转换器内部是否带有锁存器

由于 D/A 转换需要一定的时间，在这段时间内 D/A 转换器输入端的数字量应保持稳定，为此应在 D/A 转换器数字量输入端设置锁存器。目前的 D/A 转换器内部大多带有锁存器，有的还具有双重或多重数据缓冲电路。

### 10.1.2 DAC 主要性能指标

D/A 转换器的技术性能指标是实际工程中选型的依据。

#### 1. D/A 转换时间

描述 D/A 转换器转换快慢的一个参数，用于表明转换时间或转换速度。是指输入数字量变化时，输出电压量变化达到终值误差 $\pm(1/2)\text{LSB}$  时所需的时间。就是与输入二进制数最低有效位 LSB(Least Significant Bit)相当的输出模拟电压，简称 1LSB。电流输出的转换时间较短，而电压输出的转换器，由于要加上完成 I/V 转换的运算放大器的延迟时间，因此转换时间要长一些。快速 D/A 转换器的转换时间可控制在  $1\mu\text{s}$  以下。

#### 2. 分辨率

指单片机输入给 D/A 转换器的单位数字量的变化所引起的模拟量输出的变化。DAC 的分辨率为输出满刻度值与  $2^n$  之比，这就意味着 D/A 转换器能对转换范围的  $1/2^n$  输入量作出反应，称为分辨率。 $n$  为 D/A 转换器的位数。

例如，8 位的 D/A 转换器，若满量程输出为 10V，根据分辨率定义，则分辨率为  $10\text{V}/2^n$ ，分辨率为： $10\text{V}/256=39.1\text{mV}$ ，即输入的二进制数最低位的变化可引起输出的模拟电压变化 39.1mV，该值占满量程的 0.391%，常用符号 1LSB 表示。

使用时，应根据对 D/A 转换器分辨率的需要来选定 D/A 转换器的位数。

#### 3. D/A 转换精度

D/A 转换精度用来表示 D/A 转换器实际输出电压与理论输出电压的偏差，通常以满输出电压  $V_{\text{FS}}$  的百分数给出。但由于电源电压、基准电压、电阻、制造工艺等各种因素存在着误差，严格来讲，转换精度与分辨率并不完全一致。只要位数相同，分辨率则相同，但相同位数的不同转换器，转换精度会有所不同。例如，精度为 $\pm 0.1\%$ 是指最大输出误差为  $V_{\text{FS}}$  的 0.1%，如果  $V_{\text{FS}}$  为 5V，则最大输出误差为 5mV。

#### 4. D/A 线性度

线性度是指输入数字量变化时，DAC 输出的模拟量按比例关系变化的程度。实际 D/A 转换器输出偏离理想输出的最大偏差称为线性误差。

#### 5. D/A 的温度灵敏度

它是指数字量输入不变的情况下，输出模拟量信号随温度变化产生的变化量。一般 D/A 转换器的温度灵敏度为 $\pm 50 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

### 10.1.3 8 位 D/A 转换器 DAC0832 及与单片机接口

#### 1. DAC0832 简介

DAC0832 是美国国家半导体公司的产品, 其主要特性参数如下: 8 位分辨率; 电流输出型 DAC, 电流建立时间为  $1\mu\text{s}$ ; 相对精度,  $1/2\text{LSB}$ ; 单电源供电,  $+5\sim+15\text{V}$ ; 基准电压的范围为  $\pm 10\text{V}$ , CMOS 工艺, 低功耗  $20\text{mW}$ ; 具有锁存功能的 8 位三态输入数据线。

DAC0832 的外部引脚及内部结构如图 10.3 所示。

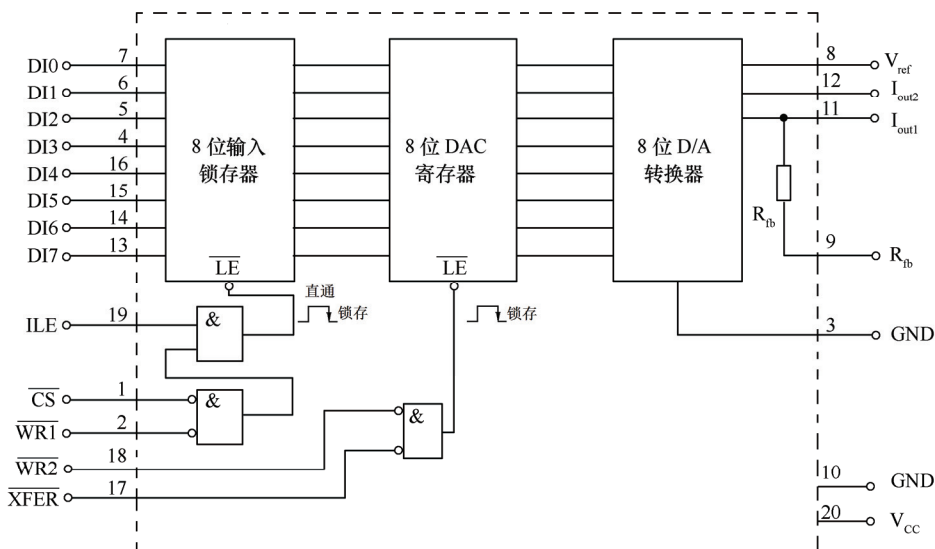


图 10.3 DAC0832 的外部引脚及内部结构图

$\overline{\text{CS}}$ : 片选信号输入端, 低电平有效。

ILE: 输入锁存使能信号, 高电平有效。

$\overline{\text{WR1}}$ : 输入锁存器写选通信号, 低电平有效;  $\overline{\text{WR1}}$  为低且 ILE=1 时, 允许 8 位数据总线上的数据输入到输入锁存器中,  $\overline{\text{WR1}}$  为高, 锁存输入锁存器中的数据。

$\overline{\text{WR2}}$ : DAC 数据寄存器写控制信号, 低电平有效。  $\overline{\text{WR2}}$  为低, 且  $\overline{\text{XFER}}$  为低电平时, 输入锁存器中的数据传输到 DAC 数据寄存器中, 并自动开始进行 D/A 转换。

$\overline{\text{XFER}}$ : 数据传输控制信号, 低电平有效。与  $\overline{\text{WR2}}$  一起控制输入数据锁存器和 DAC 数据寄存器之间的数据传输。

DI7~DI0: 8 位数据输入总线。

$I_{\text{out1}}$ : 电流输出 1, 当 DAC 寄存器中各位为全“1”时, 电流最大; 为全“0”时, 电流为 0。

$I_{\text{out2}}$ : 电流输出 2, 电路中保证  $I_{\text{out1}} + I_{\text{out2}} = \text{常数}$ 。

$R_{\text{fb}}$ : 反馈电阻端, 片内集成的电阻为  $15\text{k}\Omega$ 。

$V_{\text{ref}}$ : 参考电压, 可正可负, 范围  $-10\sim+10\text{V}$ 。

$V_{\text{CC}}$ : 电源, 可在  $+5\sim+15\text{V}$  间选择。

GND: 地信号。

DAC0832 中“8 位输入寄存器”用于存放单片机送来的数字量, 使输入数字量得到缓冲和锁存; “8 位 DAC 寄存器”用于存放待转换的数字量; “8 位 D/A 转换电路”受“8 位 DAC 寄存器”输出的数字量控制, 能输出和数字量成正比的模拟电流。因此, 需外接 I/V 转换的运算放大器电路, 才能得到模拟输出电压。

## 2. DAC0832 工作方式

DAC0832 根据外部控制信号的连接方式不同,有直通方式、单缓冲方式和双缓冲方式 3 种工作方式。

### (1) 直通方式

将  $\overline{\text{ILE}}$  接高电平,  $\overline{\text{CS}}$ ,  $\overline{\text{WR1}}$ ,  $\overline{\text{WR2}}$ ,  $\overline{\text{XFER}}$  接地,则内部所有寄存器没有数据锁存功能,DAC0832 工作于直通方式。此方式下,加载在数据线上的数据直接连接到 D/A 转换网络。如果在 D/A 转换没有完成之前,数据线上的数据发生变化,则导致 D/A 转换输出不可靠的结果,所以直通模式较少使用。

### (2) 单缓冲方式

DAC0832 的两个输入寄存器中,有一个处于直通方式,而另一个处于受控的锁存方式,也可使两个寄存器同时选通及锁存。在实际应用中,如果只有一路模拟量输出,或虽是多路模拟量输出但并不要求多路输出同步的情况下,可采用单缓冲方式。

### (3) 双缓冲方式

DAC0832 的两个锁存器都接成受控锁存方式。由于两个锁存器分别占据两个地址,因此在程序中需要使用两条传送指令,才能完成一个数字量的模拟转换。多路的 D/A 转换要求同步输出时,必须采用双缓冲同步方式。

## 3. 常见 DAC 与 80C51 单片机接口应用举例

80C51 单片机没有与 DAC0832 的专门接口,但是可以把 DAC0832 当作 80C51 的外部数据存储空间进行访问。设计接口电路时,常用单缓冲方式或双缓冲方式的单极性输出。下面举例说明各种应用情况。

### (1) 单缓冲方式的应用举例

**【例 10.1】**工作系统中,要求通过 80C51 单片机控制 DAC0832 输出 2.5V 的模拟量电压,写出分析过程和驱动程序。硬件连接如图 10.4 所示, $V_{\text{ref}}$  工作为 -5V; DAC0832 的  $\overline{\text{CS}}$  连接 80C51 的 P2.7, 所以其地址的最高位为 0, 其他位任意。为了能够尽量避免与其他地址冲突,可以人为设置其地址为 7FFFH。

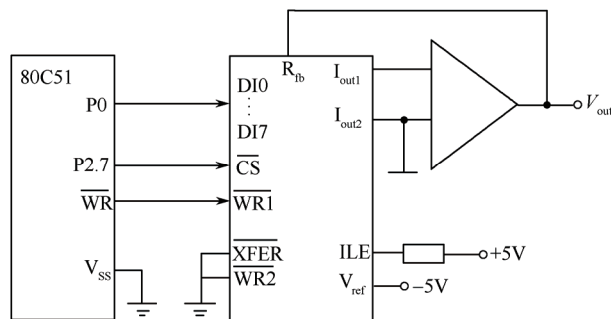


图 10.4 80C51 和 DAC0832 硬件连接原理图

可以使用以下代码控制 DAC0832 输出模拟电压:

```
MOV DPTR,#7FFFH
MOV A,#DATA
MOVX @DPTR,A
```

目前为止,所讨论的 DAC0832 的应用电路,模拟量输入都是单极性的,其数字量输入编码与模拟量输出的关系可由下式进行计算,即

$$V_{\text{out}} = -\frac{V_{\text{ref}} \times \text{DATA}_{\text{in}(10)}}{256}$$

式中，DATA 下标 (10) 表示为十进制数参与运算。题目中  $V_{\text{ref}} = -5\text{V}$ ，按上式计算如果要输入与输出 2.5V 的电压，输入的数字量转化为十进制数应为 128。

## (2) 双缓冲方式的应用举例

多路的 D/A 转换要求同步输出时，由于数字量的输入锁存和 D/A 转换输出是分两步完成的，所以必须采用双缓冲的同步方式。单片机必须通过  $\overline{\text{LE1}}$  来锁存待转换的数字量，通过  $\overline{\text{LE2}}$  来启动 D/A 转换。

因此，双缓冲方式下，DAC0832 应为单片机提供两个 I/O 端口。MCS-51 单片机和 DAC0832 在双缓冲方式下的连接如图 10.5 所示。

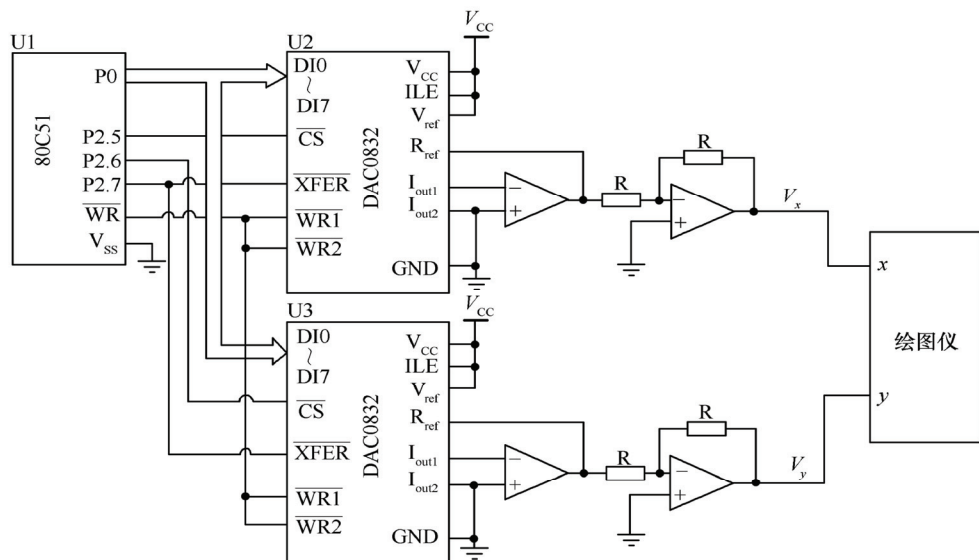


图 10.5 例 10.2 硬件连接图

**【例10.2】**有一种绘图仪，输入两个模拟量  $x$ ， $y$  则可以在仪器上根据输入模拟量的变化绘制出  $x$ ， $y$  的关系曲线图。现通过一个 80C51 单片机和两片 DAC0832 与此绘图仪连接，如果  $x$ ， $y$  值同时更新则可以绘制出平滑的曲线图，否则就会出现阶梯波形图，因此需要使 DAC0832 工作在双缓冲方式。硬件连接如图 10.5 所示。U2 的  $\overline{\text{CS}}$  连接 P2.5，其输入寄存器地址为 0DFFFH，U3 的  $\overline{\text{CS}}$  连接 P2.6，其输入寄存器地址为 0BFFFH，两个 DAC0832 的  $\overline{\text{XFER}}$  连接在一起接到 P2.7，其地址为 7FFFH。所有的  $\overline{\text{WR1}}$ 、 $\overline{\text{WR2}}$  都接到 80C51 的  $\overline{\text{WR}}$  引脚。U2 用来输出  $x$  值，U3 用来输入  $y$  值。

有 20 组  $x$ ， $y$  值分别存在地址 30H，50H 开始的数据存储器中，编写能把 30H 和 50H 中数据从 U2 和 U3 两片 DAC0832 同步输出的程序。程序中 30H 和 50H 中的数据，即为绘图仪所绘制曲线的  $x$ 、 $y$  坐标点。

参考代码如下：

```

ORG      2000H
DTOUT:  MOV    R0,#30H           ;R0 指向 30H
        MOV    R2,#0             ;清计数器为 0
        MOV    R1,#50H          ;R1 指向 50H

```

```

;输出 x 数据到 DAC0832 U2 的输入寄存器
GOON:  MOV  DPTR,#0DFFFH          ;x 数据 DAC 地址为 DFFFH
        MOV  A,@R0                ;
        MOVX  @DPTR,A            ;写数据到 DAC0832 U2
        INC  R0                  ;x 数据指针指向下一个数据
;输出 y 数据到 DAC0832 U3 的输入寄存器
        MOV  DPTR,#0BFFFH          ;y 数据 DAC 地址为 BFFFH
        MOV  A,@R1                ;
        MOVX  @DPTR,A            ;写数据到 DAC0832 U3
        INC  R1                  ;y 数据指针指向下一个数据
;把所有 DAC0832 的输入数据寄存器的数据写入到 DAC 转换寄存器,
;1μs 后同时输出数据到绘图仪
        MOV  DPTR,#7FFFH          ;DAC 转换寄存器地址为 7FFFH
        MOVX  @DPTR,A            ;使能  $\overline{\text{WR}}$  和  $\overline{\text{XFER}}$ , 启动 D/A 转换
        INC  R2                  ;统计输出数据个数
        CJNE R2,#20,GOON          ;输出 20 个数据后,绘图结束
        SJMP $                   ;停机
        END

```

### 10.1.4 12 位 D/A 转换器 DAC1208 及与单片机接口

我们从上面的两个范例可以看到, D/A 输出的模拟量的精度取决于 D/A 数字量的位数。8 位分辨率不够时, 可以采用高于 8 位分辨率的 DAC, 例如, 10 位、12 位、14 位、16 位 (如 AD669) 的 DAC。

图 10.6 是 12 位 DAC1208 内部及引脚图, 使用方法如下。

#### 1. DAC1208 简介

双缓冲, 由一个 8 位锁存器和一个 4 位锁存器共同组成, 以便和 8 位数据总线对接。

##### (1) 控制线

$\overline{\text{CS}}$ : 片选信号输入端, 低电平有效。

$\overline{\text{WR1}}$ : 写信号, 低电平有效。

$\overline{\text{WR2}}$ : 辅助写, 低电平有效。

BYTE1/ $\overline{\text{BYTE2}}$ : 字节顺序控制信号。高电平 1: 将 12 位输入锁存器全部启用; 低电平 0: 仅开启低 4 位输入锁存器。

$\overline{\text{XFER}}$ : 数据传输控制信号, 低电平有效。与  $\overline{\text{WR2}}$  一起控制输入数据锁存器和 DAC 数据寄存器之间的数据传输。

##### (2) DAC0832 的引脚功能

DI11~DI0: 12 位数据输入总线。

$I_{\text{out1}}$ : 电流输出 1, 当 DAC 寄存器中各位为全“1”时, 电流最大; 为全“0”时, 电流为 0。

$I_{\text{out2}}$ : 电流输出 2, 电路中保证  $I_{\text{out1}} + I_{\text{out2}} = \text{常数}$ 。

$R_{\text{fb}}$ : 反馈电阻端。

$V_{\text{ref}}$ : 参考电压, 可正可负, 范围为-10~+10V;

$V_{CC}$ : 电源, 可在+5~+15V 间选择。

GND: 地信号。

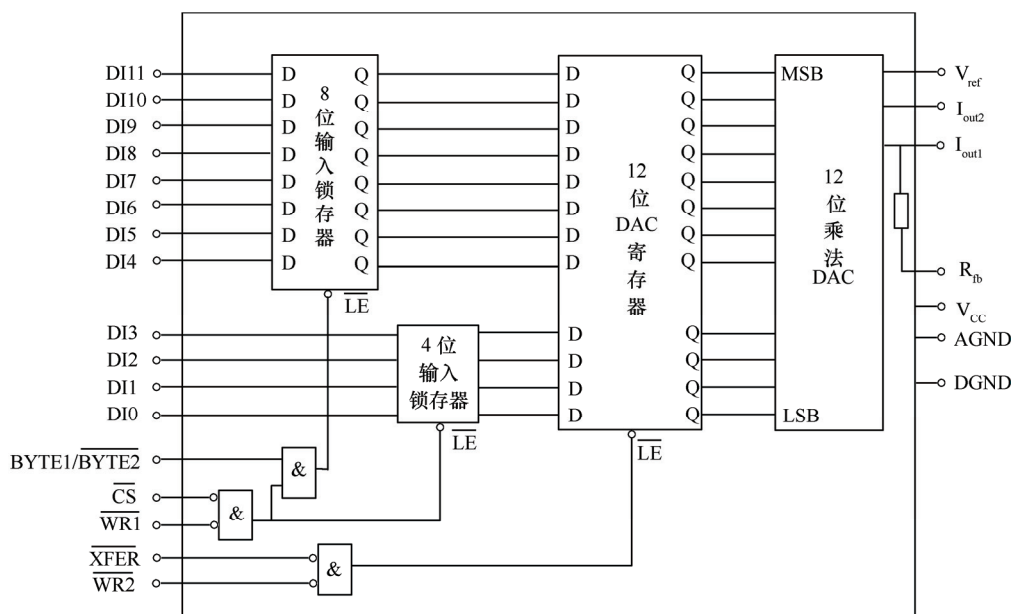


图 10.6 DAC1208 内部内部及引脚图

## 2. 接口电路设计及软件编程

【例 10.3】MCS-51 与 DAC1208 的接口电路如图 10.7 所示。

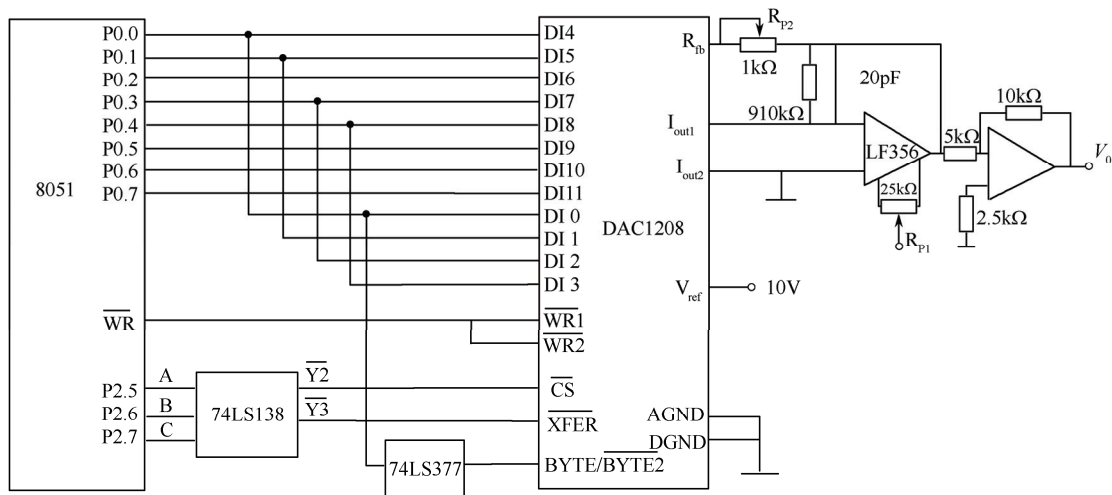


图 10.7 8051 与 DAC1208 连接图

按照 DAC1208 芯片的选通条件, 由电路图可知: 高 8 位输入寄存器端口地址 4001H; 低 4 位寄存器端口地址 4000H; DAC 寄存器的端口地址 6000H。其中运放 1 实现 I/V 变换, 运放 2 实现双极性电压输出。要求编写程序将存储在 8051 中的 12 位数据送入 DAC1208 中转换为模拟量电压输出。

由于 8051 的 P0.0 分时复用, 所以 P0.0 与 DAC1208 的连接要有锁存器 74LS377。采用双



缓冲的方式（单缓冲不合适，12 位数据如果不是同时送入，会使得结果的波动较大）。先送高 8 位数据 DI11~DI4，再送入低 4 位数据 DI3~DI0。不能按照相反的顺序送数据，否则结果会出错。当数据先后正确地进入输入寄存器后，再打开 DAC 寄存器。

编写程序如下：

```
#define DAC1208PortHighestAdr *(unsigned char*)(0X4001)
#define DAC1208PortLowestAdr *(unsigned char*)(0X4000)
#define DAC1208TransferPortAdr *(unsigned char*)(0X6000)
Void DAC1208(unsigned int dacdata) //将一个 12 位的数据写到 DAC1208 中
{
    unsigned char d;
    d = (unsigned char)(dacdata>>4); //取高 8 位的数据
    DAC1208PortHighestAdr = d; //将高 8 位的数据写到 DAC 的高 8 位数据锁存器中
    d = (unsigned char)(dacdata & 0X00F); //取低 4 位数据
    DAC1208PortLowestAdr = d; //将低 4 位数据写到 DAC 的低 4 位数据锁存器中
    DAC1208TransferPortAdr = d; //选通 DAC 内部的 DAC 寄存器，锁存同时转换 12 位数据
}
```

## 10.2 并行 A/D 转换器与单片机的接口

随着超大规模集成电路技术的飞速发展，为满足各种不同的检测及控制任务的需要，大量结构不同、性能各异的 A/D 转换芯片应运而生。A/D 转换器把模拟量转换成数字量，以便于单片机进行数据处理，实现转换的器件称为模数转换器，简称 ADC（Analog to Digital Converter）。部分单片机片内集成了 A/D 转换器，但当片内 A/D 转换器不能满足需要，还需外扩 A/D。

### 10.2.1 A/D 转换的技术指标

#### 1. 量程

量程指 A/D 转换芯片所能转换的模拟输入电压的范围，ADC 可输入的模拟电压的最小值与最大值之间的范围。当输入电压超过 A/D 转换器上、下限时，A/D 转换器上将保持输出不变。

#### 2. 分辨率

分辨率是 A/D 转换器对输出的数字量变化一个相邻的数据时，所需要的输入模拟量的最小变化量。分辨率取决于 A/D 转换器的位数，所以习惯上用输出的二进制位数或 BCD 码位数表示。对一个分辨率为  $n$  位的转换器，能够分辨的电压为满量程的  $1/2^n$ ，位数越多则分辨率越高。例如，A/D 转换器 AD1674 的满量程输入电压为 5V，可输出 12 位二进制数，即用  $2^{12}$  个数进行量化，其分辨率为 1LSB，也即  $5V/2^{12}=1.22mV$ ，其分辨率为 12 位，即 A/D 转换器能分辨出输入电压 1.22mV 的变化。

#### 3. 转换时间与转换速率

ADC 完成一次转换所需时间称为 A/D 转换时间，单位为 s。每秒采样次数专业术语为采样率，单位为 1/s，记为 sps。转换时间为转换速率倒数。如 MAX114 的转换时间为  $1\mu s$ ；转换速率： $1/1\times 10^{-6}=10^6$  sps。

由于被测量信号都有其固有频率，按照香农采样定理，测量系统必须选择合理的采样频率

才能确保采样信号不失真。市场上所能购买的 ADC 的转换时间各有不同,转换时间越短的 ADC 相对价格也越高, A/D 转换器按照转换速度可大致分为高速 A/D 和低速 A/D。

10.2.2 A/D 转换原理

A/D 转换过程主要包括采样、量化和编码。一些非电量的物理信号,如温度、湿度、压力等,首先经过传感器转换成微弱电信号,再经过放大、滤波后转换成幅度较大的电信号;然后采样电路每隔一定的时间间隔从电压信号取一个值,从而在时间上把连续的信号离散化,这就是采样;采样后的电压值在时间上是离散的,就需要把这些电压值分成有限的数值区间,在某个区间内的所有电压值都对应一个数字量,这个过程就称为量化,量化会导致误差,称为量化误差;给每个可能的量化输出值都对应唯一的数字量输出,就是编码,编码后的输出数字量就是 A/D 转换的结果。

尽管 A/D 转换器的种类很多,但目前广泛应用在单片机应用系统中的主要有逐次比较型转换器和双积分型转换器,此外  $\Sigma-\Delta$  式转换器逐渐得到重视和较为广泛的应用。逐次比较型 A/D 转换器,在精度、速度和价格上都适中,是最常用的 A/D 转换器。

10.2.3 8 位 A/D 转换器 ADC0809 及与单片机接口

1. ADC0809 简介

ADC0809 是一个 8 位逐次逼近型 A/D 转换器,是 8 路模拟输入、8 位数字量输出的 A/D 转换器。

ADC0809 外部引脚如图 10.8 所示,共 28 引脚,双列直插式封装。引脚功能如下:

IN0~IN7: 8 路模拟信号输入端。

D0~D7: 转换完毕的 8 位数字量输出端。

OE、START、CLK: OE 为输出允许端,START 为启动信号输入端,CLK 为时钟信号输入端。

Vref+、Vref-: 基准电压输入端。

A、B、C: 控制 8 路模拟输入通道的切换。A、B、C 分别与单片机的 3 条地址线相连,3 位编码对应 8 个通道地址端口。C、B、A = 000~111 分别对应 IN0~IN7 通道的地址。各路模拟输入之间切换由软件改变 C、B、A 引脚的编码来实现。通道与地址选择关系见表 10.1。

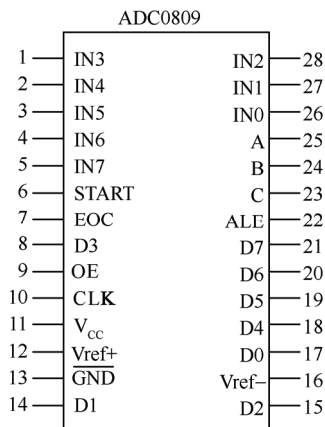


图 10.8 ADC0809 引脚分布图

表 10.1 ADC0809 通道地址选择表

模拟通道号	地址值		
	C	B	A
IN0	0	0	0
IN1	0	0	1
IN2	0	1	0
IN3	0	1	1
IN4	1	0	0
IN5	1	0	1
IN6	1	1	0
IN7	1	1	1

## 2. ADC0809 工作原理

ADC0809 内部结构如图 10.9 所示。采用逐次比较法完成 A/D 转换，单一的+5V 电源供电。片内带有锁存功能的 8 选 1 模拟开关，由 C、B、A 的编码来决定所选的通道。完成一次转换需 100 $\mu$ s 左右（转换时间与 CLK 引脚的时钟频率有关），具有输出 TTL 三态锁存缓冲器，可直接连到单片机数据总线上。整个 ADC0809 的工作过程时序要求如图 10.10 所示。

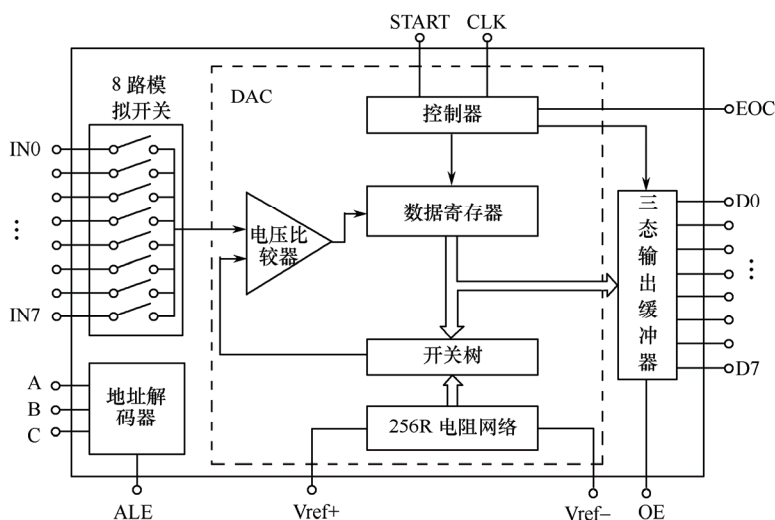


图 10.9 ADC0809 内部结构图

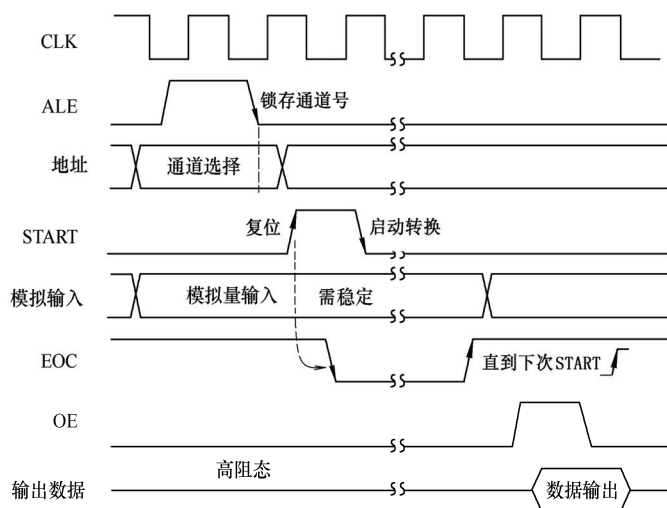


图 10.10 ADC0809 工作时序图

ADC0809 的工作过程如下：

首先，外来地址信号到 A、B、C 端，在 ALE 的上升沿将该地址锁存到内部地址锁存器，完成通道选择。START 上升沿到则复位 0809 内部电路，经过一定的延时后，EOC 变成低电平，表明准备开始转换；在 START 下降沿到，启动 0809 转换，经过一段时间后，转换完成，EOC 便输出高电平，直到下次 START 上升沿才变低。为保证转换可靠，一般要求从 START 上升沿开始直到 EOC 输出高电平的这一段时间内，模拟输入信号必须保持不变。

最后，外来 OE 信号上升沿，打开 ADC0809 输出锁存器的三态门，在 OE 下降沿到来后数据线变成高阻态。在 OE 为低电平时，数据线一直保持为高阻态。

3. ADC0809 与 80C51 单片机接口应用举例

ADC0809 是一个广泛应用的 8 位 A/D 转换器，其接口电路简单，通过合理电路设计可以把 ADC0809 当作单片机的外部扩展设备进行访问。下面举例说明。

【例 10.4】某 8 路温度检测系统，现选用 80C51 作为控制器设计系统。

硬件设计：如图 10.11 所示，传感器部分电路略，各待测物理量经过各自传感器转换成电压信号，经过放大后接入 ADC0809 的模拟量输入端口。电源电压经过滤波和稳压后接入 ADC0809 参考电压正端，参考电压负端接地；在单片机不访问外部存储器时，80C51 的 ALE 经 D 触发器 2 分频，当单片机时钟取 12MHz，则 ALE 输出为 2MHz，经过 2 分频后为 1MHz，因此可以用作 ADC 的时钟信号。

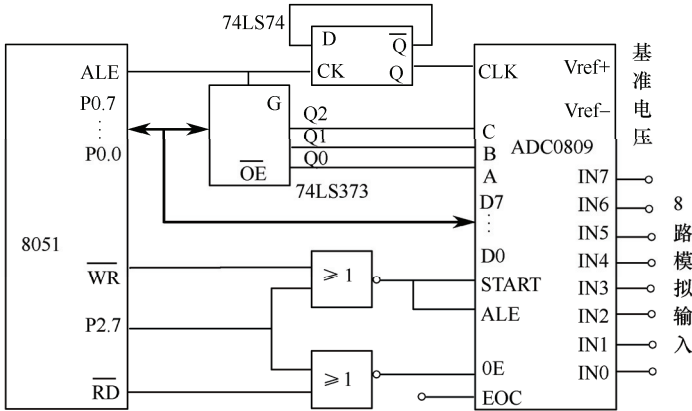


图 10.11 8051 和 ADC0809 接口电路图

ADC0809 具有三态锁存器，8 位数据输出可直接与数据总线相连。地址译码引脚 C、B、A 与地址总线 A2、A1、A0 相连以选通 8 个输入通道中的一个。图中 P2.7 作为片选信号，在启动 A/D 转换时，由  $\overline{\text{WR}}$  和 P2.7 控制 ADC 的地址锁存和转换启动，由于 ALE 和 START 连在一起，因此本例中，锁存地址的同时启动转换。

根据 MOVX 时序与图 10.11 电路可知，74LS373 锁存的是 P0 口信息，在执行 MOVX @DPTR,A 指令时，在 ALE 第二个下降沿（CPU 与外 RAM 通信），74LS373 锁存 P0 口信息是 DPL，则 Q2~Q0 是 DPL 的低 3 位，在  $\overline{\text{WR}}$  上升沿到时，Q2~Q0 仍保持不变，那么 ADC0809 在 ALE 下降沿（在 P2.7=0 时，即  $\overline{\text{WR}}$  上升沿）锁存的通道地址就是 DPL 的低 3 位，故 DPTR 的低 3 位决定通道选择。例如，通道 1 的选择及 ADC0809 启动程序如下：

```
MOV DPTR, #7FF9H ;P2.7=0,低 3 位为 001B 选择通道 1,设无关位为 1
MOVX @DPTR, A ;送出通道选择并启动转换,(A)不影响通道选择,是无关值
```

软件设计：针对图 10.11，模拟通道 1 连续进行 16 次采样的程序。要求将采样数据存放于 ADRES 为首址的片内 16 个连续单元中。采样完成后，求这 16 次采样平均值，并存于寄存器 A 中，只取整数部分。

```
ADC_addr EQU 7FF9H ;通道 1 的地址
ADRES EQU 40H
ADTIME EQU 10H
ORG 0000H
```

```

        AJMP     MAIN
        ORG     0040H
MAIN:    MOV     SP,#6FH
        MOV     DPTR,# ADC_addr
        MOV     R1,# ADTIME
        MOVX    A,@DPTR                    ;空采样一次,丢弃
        MOV     R0,#ADRES
AGAIN:   MOVX    @DPTR,A                    ;启动 A/D 转换
        MOV     R6,#0AH                    ;软件延时,等待转换结束
DELAY:   NOP
        NOP
        NOP
        DJNZ    R6,DELAY
        MOVX    A,@DPTR                    ;读 A/D 的值
        MOV     @R0,A
        INC     R0
        DJNZ    R1,AGAIN                    ;采样 16 次
        MOV     R0,#ADRES                    ;指向数据区首地址
        MOV     R1,#16
        MOV     B,#00H
        CLR     A
RRAGN:   ADD     A,@R0
        INC     R0
        JNC     CONJ
        INC     B
CONJ:    DJNZ    R1,RRAGN                    ;求 16 个数的和
        MOV     R1,#4                        ;右移 4 次
        MOV     R0,A                        ;和的低位暂存于 R0 中
RRAGN1:  CLR     C
        MOV     A,B
        RRC     A
        MOV     B,A
        MOV     A,R0
        RRC     A
        MOV     R0,A
        DJNZ    R1,RRAGN1                    ;求平均值
STOP:    SJMP    STOP                        ;软停机
        END

```

注意：在连续采样之前，进行一次空采样，并将其丢弃。因为该数据与本次采样无关。本例的处理方法在传感器信号经 A/D 采样处理中较为常见，可以称之为均值滤波。

10.2.4 12 位 A/D 转换器 AD1674 及与单片机接口

1. AD1674 简介

AD1674 是一款 12 位逐次逼近型 A/D 转换器，是 AD 公司 AD574 的升级产品，与 AD574 引脚兼容。内部集成时钟电路、10V 基准参考电压和三态输出缓冲器，相对于 AD574 还增加了采样保持电路。典型转换时间为 10μs，1 路模拟量输入。模拟电路工作电压为 12 或 15V。数字电路工作电压为 +5V，与 TTL 电平兼容。单极性模式下：模拟电压输入范围 0~+10V 或 0~+20V；双极性模式下：模拟电压输入范围为-5~+5V，或-10~+10V。其外部引脚分布如图 10.12 所示。

AD1674 带有三态缓冲电路，而且允许转换结果以一次性 12bit 方式读出或以 8bit 方式分两次读出。由于具有锁存和采样保持电路，因此 AD1674 可以方便地以 8 位或 16 位地址总线扩展连接。

AD1674 的控制信号包括：片选信号  $\overline{CS}$ ，读转换数据和转换控制信号  $R/\overline{C}$ ，选择数据寄存器的地址 A0，接口总线宽度控制信号 12/8。

当 A0=0 时，AD1674 进行全 12 位转换；当 A0=1 时，仅进行 8 位转换。AD1674 启动后，内部开始进行 A/D 转换，转换不能中途停止，也不能重新开始。AD1674 的操作真值表见表 10.2。

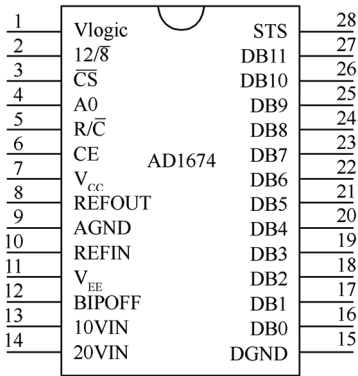


图 10.12 AD1674 引脚分布图

表 10.2 AD1674 操作真值表

CE	$\overline{CS}$	$R/\overline{C}$	12/8	A0	操作
0	×	×	×	×	无
×	1	×	×	×	无
1	0	0	×	0	启动 12 位 A/D 转换
1	0	0	×	1	启动 8 位 A/D 转换
1	0	1	1	×	读取 12 位 A/D 转换数据
1	0	1	0	0	读取 A/D 转换的高 8 位
1	0	1	0	1	读取 A/D 转换的低 4 位和 4 个 0

2. AD1674 的工作原理

AD1674 有一个转换结束状态信号输出端 STS，当 AD1674 处于转换过程中时 STS=1，一旦转换结束 STS=0。每次启动 AD1674 开始，STS 不会立即进入高电平，大约 0.3μs 才转换为高电平。通过改变 AD1674 引脚 8、10、12 的外接电路，可使 AD1674 实现单极性输入和双极性输入模拟信号的转换。

单极性输入电路，可实现输入信号 0~10V 或 0~20V 的转换。当输入信号为 0~10V 时，应从 10V<sub>IN</sub> 引脚输入（引脚 13）；输入信号为 0~20V 时，应从 20V<sub>IN</sub> 引脚输入（引脚 14）。单极性应用的典型电路连接如图 10.13 所示：BIPOFF 引脚连接到模拟地，REFIN 引脚通过一个 50Ω 电阻接到 REFOUT 引脚。A/D 转换结果与输入模拟量  $V_{in}$  的计算公式为

$$DOUT = \left[ \frac{V_{in}}{10V(或20V)} \times 2^n \right]$$

[ ]表示使用四舍五入法取整；模拟信号从 10VIN 输入时，上式选择 10V，否则选择 20V。

例如，AD1674 工作在 12 位模式：

从 10VIN 输入 1mV 电压信号，对应转换结果 DOUT=000H；

从 10VIN 输入 9.996V 电压信号，对应转换结果 DOUT=FFE H；

从 10VIN 输入 9.997V 电压信号，对应转换结果 DOUT=FFF H。

双极性转换电路，可实现输入信号 $-10\sim+10\text{V}$ 或 $0\sim+20\text{V}$ 的转换。双极性应用的典型电路连接如图 10.14 所示，BIPOFF 通过一个  $50\Omega$  电阻连接到 REFOUT 引脚，REFIN 通过一个  $50\Omega$  电阻连接到 REFOUT 引脚。其他电路连接与单极性相同。

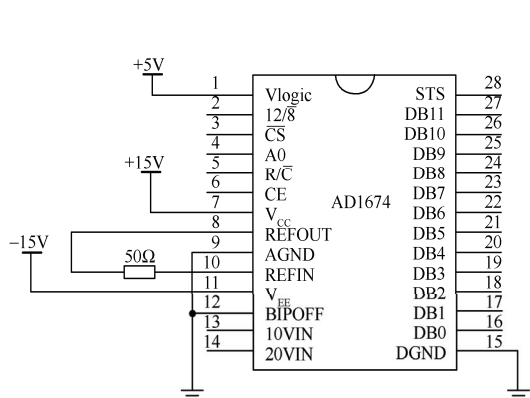


图 10.13 AD1674 单极性输入典型电路

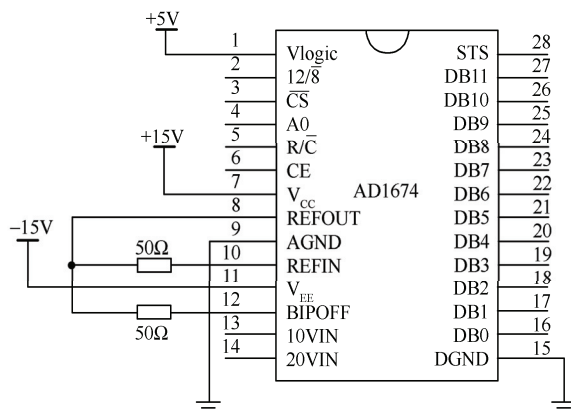


图 10.14 AD1674 双极性输入典型电路

双极性方式下计算公式为

$$DOUT = \left[ \frac{V_{in} + \frac{10V(\text{或}20V)}{2}}{10V(\text{或}20V)} \times 2^n \right]$$

[ ]表示使用四舍五入法取整；模拟信号从 10VIN 输入时，上式选择 10V，否则选择 20V。

例如，AD1674 工作在 12 位模式：

从 10VIN 引脚输入 $-4.999\text{V}$ 电压，对应转换结果为 DOUT=000H；

从 10VIN 引脚输入 $-3\text{mV}$ 电压，对应转换结果为 DOUT=7FFH；

从 10VIN 引脚输入 $-1\text{mV}$ 电压，对应转换结果为 DOUT=800H；

从 10VIN 引脚输入  $4.997\text{V}$  电压，对应转换结果为 DOUT=FFFH。

### 3. AD1674 与 80C51 的接口设计

80C51 单片机是 8 位处理器，与 AC1674 连接时要求其数据格式为 8 位。由于 AD1674 片内含有高精度的基准电压源和时钟电路，从而使 AD1674 无须任何外加电路和时钟信号即可完成 A/D 转换，使用非常方便。为了能够清楚讨论 80C51 与 12 位 ADC 的接口方式，设置 AD1674 工作在 12 位 ADC 模式。电路采用双极性输入接法，可对 $-5\sim+5\text{V}$ 或 $-10\sim+10\text{V}$ 模拟信号进行转换。转换结果的高 8 位从 DB11~DB4 输出，低 4 位从 DB3~DB0 输出，即 A0=0 时，读取结果的高 8 位；当 A0=1 时，读取结果的低 4 位。若遵循左对齐的原则，DB3~DB0 应接单片机的 P0.7~P0.4。

本例中的电路设计如图 10.15 所示。STS 引脚接单片机的 P1.0 引脚，采用查询方式读取转换结果。分析此电路设计可知，当单片机执行对外部数据存储器写指令访问 FF7CH 时，CE=1，

$\overline{CS}=0$ ,  $R/\overline{C}=0$ ,  $A0=0$ , 启动 AD1674 开始 12 位 A/D 转换; 启动后, 当单片机查询 P1.0 的值为低电平, 表示 AD1674 转换结束; 当单片机访问外部数据单元 FF7EH, 对应  $CE=1$ ,  $\overline{CS}=0$ ,  $R/\overline{C}=1$ ,  $12/\overline{8}=0$ ,  $A0=0$ , 单片机读取结果高 8 位; 80C51 读取外部数据单元 FF7FH, 对应  $CE=1$ ,  $\overline{CS}=0$ ,  $R/\overline{C}=1$ ,  $12/\overline{8}=0$ ,  $A0=1$ , 此时单片机读取 A/D 转换低 4 位。

对应启动和读取一次 A/D 转换结果的参考程序如下:

```
MOV R0,#40H ;把 A/D 转换的结果存在 40H 开始的两个单元内
;高地址存高 8 位,低地址存低 4 位加 4 个 0

MOV DPTR,#0FF7CH ;写片外存储单元 FF7CH,启动 AD1674
MOVX @DPTR,A
SETB P1.0

LOOP: NOP

JB P1.0, LOOP ;查询 STS 状态,直到 STS=0,表示转换结束

MOV DPTR,#0FF7FH ;读取 A/D 转换的低 4 位
MOVX A,@DPTR ;存在 40H 单元的高 4 位,低 4 位全 0
MOV @R0,A
INC R0

MOV DPTR,#0FF7EH ;读取 A/D 转换的高 8 位,
MOVX A,@DPTR ;数据存在 41H 单元
MOV @R0,A
```

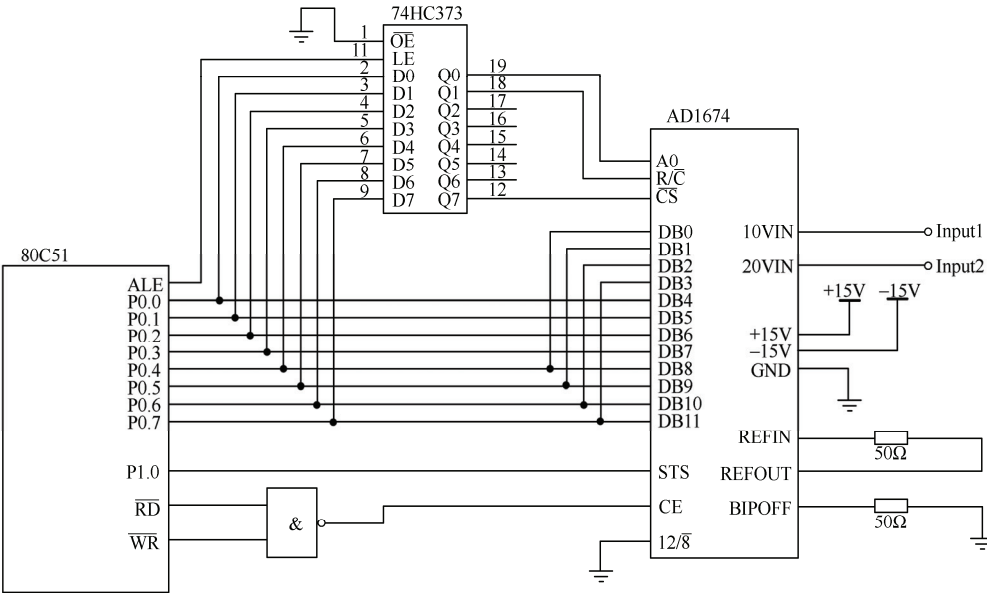


图 10.15 AD1674 与 80C51 连接原理图

### 10.3 串行 A/D 转换器与单片机的接口

在一些温度或压力等测量电路中,常常需要多路测量,有时还需要扩展显示界面(如 LCD),前面介绍的并行接口的 A/D 和 D/A 需要占据大量的单片机 I/O 口,这时就会显得单片机的 I/O 接口不够用了。而此时如果使用串行 A/D、D/A 转换器,就可以节省 I/O 口的使用数量。串行



A/D、D/A 转换器是通过串行数据总线与处理器交换数据的器件，市面常用的有 SPI 和 I<sup>2</sup>C 等串口 A/D、D/A 转换器。本节以海芯科技在电子秤行业中被广泛应用的串行 A/D 芯片 HX711 为例，讨论串行 A/D、D/A 转换器与单片机的接口方法。

10.3.1 串行 A/D 转换器 HX711 介绍

HX711 采用了海芯科技集成电路专利技术，是一款专为高精度电子秤而设计的 24 位 A/D 转换器芯片。与同类型其他芯片相比，该芯片集成了包括稳压电源、片内时钟振荡器等其他同类型芯片所需要的外围电路，具有集成度高、响应速度快、抗干扰性强等优点，降低了电子秤的整机成本，提高了整机的性能和可靠性。

该芯片与后端 MCU 芯片的接口和编程非常简单，所有控制信号由引脚驱动，无须对芯片内部的寄存器编程。输入选择开关可任意选取通道 A 或通道 B，与其内部的低噪声可编程放大器相连。通道 A 的可编程增益为 128 或 64，对应的满额度差分输入信号幅值分别为±20mV 或 ±40mV。通道 B 则为固定的 32 增益，用于系统参数检测。芯片内提供的稳压电源可以直接向外部传感器和芯片内的 A/D 转换器提供电源，系统板上无须另外的模拟电源。芯片内的时钟振荡器不需要任何外接器件。上电自动复位功能简化了开机的初始化过程。

HX711 的引脚分布如图 10.16 所示，相关引脚说明见表 10.3。

表 10.3 引脚描述

引脚号	名称	性能	描述
1	VSUP	电源	稳压电路供电电源：2.6~5.5V
2	BASE	模拟输出	稳压电路控制输出（不用稳压电路时 为无连接）
3	AVDD	电源	模拟电源：2.6~5.5V
4	VFB	模拟输入	稳压电路控制输入（不用稳压电路时 应接地）
5	AGND	地	模拟地
6	VBG	模拟输出	参考电源输出
7	INNA	模拟输入	通道 A 负输入端
8	INPA	模拟输入	通道 A 正输入端
9	INNB	模拟输入	通道 B 负输入端
10	INPB	模拟输入	通道 B 正输入端
11	PD_SCK	数字输入	断电控制（高电平有效）和串口时钟 输入
12	DOUT	数字输出	串口数据输出
13	XO	数字输入/输出	晶振输入（不用晶振时为无连接）
14	XI	数字输入	外部时钟或晶振输入，0：使用片内振 荡器
15	RATE	数字输入	输出数据速率控制，0：10Hz；1：80Hz
16	DVDD	电源	数字电源：2.6~5.5V

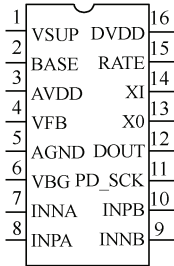


图 10.16 HX711 引脚分布图

### 10.3.2 工作原理

#### 1. 模拟输入

通道 A 模拟差分输入可直接与桥式传感器的差分输出相接。由于桥式传感器输出的信号较小，为了充分利用 A/D 转换器的输入动态范围，该通道的可编程增益较大，为 128 或 64，这些增益所对应的满量程差分输入电压分别为 $\pm 20\text{mV}$ 或 $\pm 40\text{mV}$ 。通道 B 为固定的 32 增益，所对应的满量程差分输入电压为 $\pm 80\text{mV}$ 。通道 B 应用于包括电池在内的系统参数检测。

#### 2. 供电电源

数字电源 (DVDD) 应使用与 MCU 芯片相同的数字供电电源。HX711 芯片内的稳压电路可同时向 A/D 转换器和外部传感器提供模拟电源。稳压电源的供电电压 (VSUP) 可与数字电源 (DVDD) 相同。稳压电源的输出电压值 (VAVDD) 由外部分压电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和芯片的输出参考电压 VBG 决定， $VAVDD = VBG(R_1 + R_2)/R_2$ 。应选择该输出电压比稳压电源的输入电压 (VSUP) 低至少 100mV。如果不使用芯片内的稳压电路，引脚 VSUP 应连接到 DVDD 或 AVDD 中电压较高的一个引脚上。引脚 VBG 上不需要外接电容，引脚 VFB 应接地，引脚 BASE 为无连接。

#### 3. 时钟选择

如果将引脚 XI 接地，HX711 将自动选择使用内部时钟振荡器，并自动关闭外部时钟输入和晶振的相关电路。这种情况下，典型输出数据速率为 10Hz 或 80Hz。

如果需要准确地输出数据速率，可将外部输入时钟通过一个 20pF 的隔直电容连接到 XI 引脚上，或将晶振连接到 XI 和 XO 引脚上。这种情况下，芯片内的时钟振荡器电路会自动关闭，晶振时钟或外部输入时钟电路被采用。此时，若晶振频率为 11.0592MHz，输出数据速率为准确的 10Hz 或 80Hz。输出数据速率与晶振频率以上述关系按比例增加或减少。使用外部输入时钟时，外部时钟信号不一定需要为方波。可将 MCU 芯片的晶振输出引脚上的时钟信号通过 20pF 的隔直电容连接到 XI 引脚上，作为外部时钟输入。外部时钟输入信号的幅值可低至 150mV。

#### 4. 串口通信

串口通信线由引脚 PD\_SCK 和 DOUT 组成，用来输出数据，选择输入通道和增益。当数据输出引脚 DOUT 为高电平时，表明 A/D 转换器还未准备好输出数据，此时串口时钟输入信号 PD\_SCK 应为低电平。当 DOUT 从高电平变低电平后，PD\_SCK 应输入 25~27 个不等的时钟脉冲。其中第一个时钟脉冲的上升沿将读出输出 24 位数据的最高位 (MSB)，直至第 24 个时钟脉冲完成，24 位输出数据从最高位至最低位逐位输出完成。第 25~27 个时钟脉冲用来选择下一次 A/D 转换的输入通道和增益。参见表 10.4。

PD\_SCK 的输入时钟脉冲数不应少于 25 或多于 27，否则会造成串口通信错误。当 A/D 转换器的输入通道或增益改变时，A/D 转换器需要 4 个数据输出周期才能稳定。DOUT 在 4 个数据输出周期后才会从高电平变低电平，输出有效数据。

数据输出、输入通道和增益选择时序如图 10.17 所示。

表 10.4 输入通道增益选择

PD_SCK 脉冲数	输入通道	增益
25	A	128
26	B	32
27	A	64

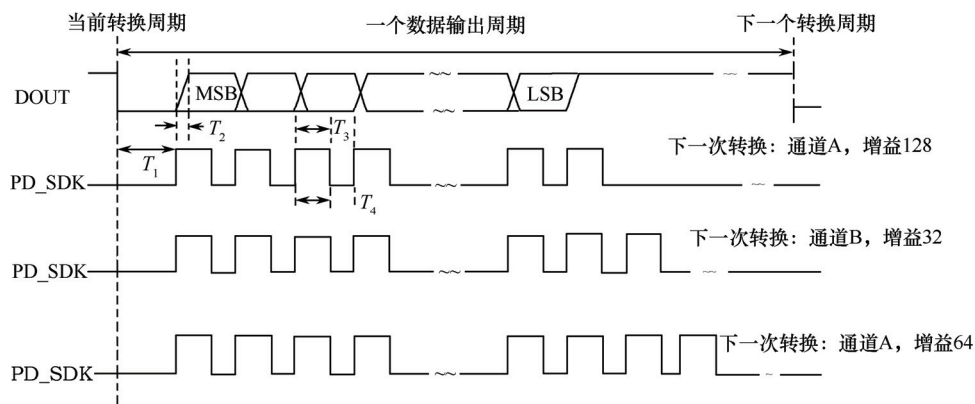


图 10.17 HX711 时序图

### 10.3.3 80C51 和 HX711 的接口设计

80C51 单片机没有硬件 I<sup>2</sup>C 接口，因此不能直接与 HX711 通信。解决的办法就是通过软件模拟出一个 I<sup>2</sup>C 接口。硬件设计原理图如图 10.18 所示，HX711 的 DOUT 连接 80C51 的 P2.0 口，PD\_SCK 接 P2.1 口。然后通过编写代码控制 P2.0 和 P2.1 的电平变化，模拟 I<sup>2</sup>C 的各个状态，向 HX711 传送数据。

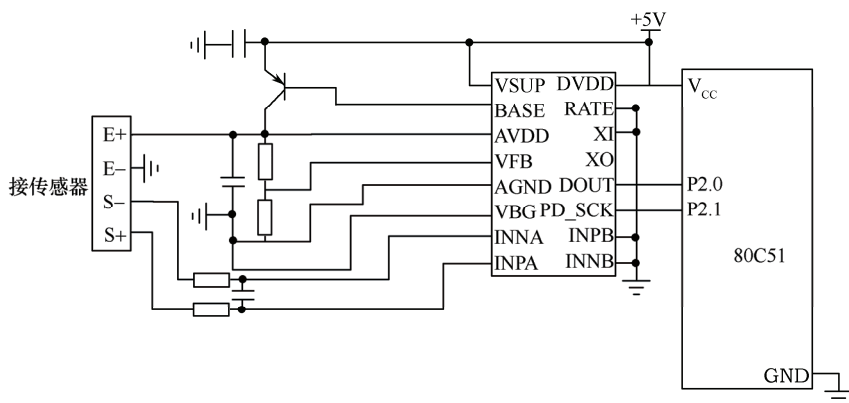


图 10.18 HX711 与 80C51 连接原理图

从 HX711 读取一次 A/D 转换结果的参考程序如下：

```
sbit ADD0=P2^0;
sbit ADSK=P2^1;
unsigned long ReadCount(void)
{
    unsigned char i;
    ADD0=1;
    ADSK=0;
    Count=0;
    while(ADD0);
    for(i=0;i<124;i++)
    {
        ADSK=1;
```

```

        Count=Count<<1;
        ADSK=0;
        if(ADD0)Count++;
    }

    ADSK=1;
    Count=Count^0x800000;
    ADSK=0;
    return(Count);
}

```

## 本章小结

本章简单分析了 A/D, D/A 转换的工作原理, 介绍了 A/D 转换器和 D/A 转换器的主要性能和参数, 并通过举例详细分析了这些器件与 80C51 单片机的接口设计方法。

10.1 节主要介绍了 D/A 转换器的工作原理, 从基本的电路原理出发, 分析了输入数据转换的方法。D/A 转换器的性能参数比较多, 比较重要的是: 转换时间、分辨率。DAC0832 是一个典型的 D/A 转换器件, 可以工作在直通方式、单缓冲方式和双缓冲方式, 通过合理的电路设计还可以输出单极性电压和双极性电压信号。本书介绍了单极性电压输出的典型应用, 双极性方式读者可以在课外查找学习相关资料。10.2 节介绍了 ADC 的种类, 深入分析了 A/D 转换器的工作原理。书中还介绍了 8 位 A/D 转换器 ADC0809 和 12 位 A/D 转换器 AD1674 的工作原理及应用方法, 给出了 AD1674 的输入模拟电压与输出模拟电压的计算公式。10.3 节介绍了 I<sup>2</sup>C 串行接口 24 位 A/D 转换器 HX711 的控制方法、读写时序要求。

D/A 和 A/D 转换器是实际应用中非常重要和常用的器件, 读者需要通过实验掌握 A/D, D/A 的使用方法, 并仔细体会各个参数的意义, 能够正确地根据应用需求选择合理的器件。

## 思考题及习题

- 10.1 简述 A/D, D/A 转换器的基本原理。
- 10.2 A/D 转换器的主要性能参数有哪些?
- 10.3 D/A 转换器的主要性能参数有哪些?
- 10.4 DAC0832 与 80C51 接口时, 有哪 3 种工作方式? 各有何特点?
- 10.5 ADC0809 是\_\_\_\_通道\_\_\_\_位分辨率的 A/D 转换器, 转换时间约为\_\_\_\_\_。
- 10.6 ADC0809 为\_\_\_\_位的 A/D 转换器, 其分辨率为满量程电压的\_\_\_\_\_。
- 10.7 AD1674 可以工作在哪些模式下? 数据格式有几种?
- 10.8 HX711 与 ADC0809、DAC0832 相比有哪些不同?

10.9 在 5V 电压的工作系统中, 硬件连接如图 10.19 所示, V<sub>CC</sub> 工作为 5V, 单片机工作时钟为 12MHz, 机器周期为 1μs; DAC0832 的  $\overline{CS}$  连接 80C51 的 P2.7, 所以其地址的最高位为 0, 其他位任意。为了能够尽量避免与其他地址冲突, 可以人为设置其地址为 7FFFH。此外, 图中使用了两个运放, 前级用来转换电流成电压, 后级用来把负电压变成正电压输出。

- (1) 写出使用 C 语言通过 80C51 单片机控制 DAC0832 输出锯齿波的程序。
- (2) 编写汇编源程序输出三角波, 并利用 Proteus 进行仿真。

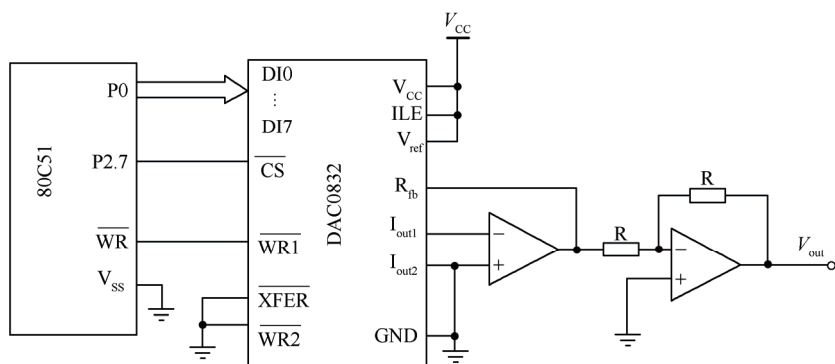


图 10.19 硬件连接原理图

10.10 如图 10.20 所示 ADC0809 接口电路。

(1) 实现 8 路模拟信号轮流采集一次数据，并将采集结果放在数组 ad 中，请利用查询方式编写程序。

(2) 编写汇编语言源程序，实现 IN1~IN4 模拟信号循环采集数据，结果依次存在单片机内部 30H~33H，利用 Proteus 进行仿真。

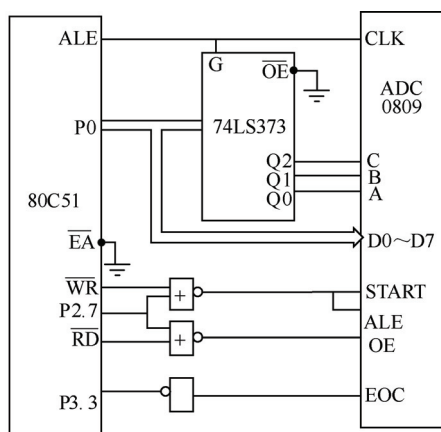


图 10.20 ADC0809 接口电路

# 第 11 章 80C51 应用系统设计方法

一个实际的单片机应用系统除需要进行多种配置及其接口连接外，还会涉及更为复杂的内容和问题。因此，单片机应用系统设计还应遵循一些基本原则和方法，本章就此进行做进一步的分析和讨论，并给出具体应用实例供读者参考。

## 11.1 单片机应用设计过程

从系统的角度来看，单片机应用系统是由硬件系统和软件系统两部分组成的。在系统的研制过程中，硬件和软件必须紧密结合、协调一致，硬件设计时应考虑软件设计方法，而软件也一定是基于硬件基础上进行设计的，这就是所谓的“软硬结合”。

图 11.1 描述了单片机应用系统设计的一般过程。下面讲述单片机应用系统开发的各阶段的具体内容。

### 11.1.1 确定系统的功能与性能

由需求调查可以确定出单片机应用系统设计的目标，这一目标包括系统功能和系统性能。系统功能主要有数据采集、数据处理、输出控制等。每个功能又可细分为若干个子功能。

在确定了系统的全部功能之后，就应确定每种功能的实现途径，即哪些功能由硬件完成、哪些功能由软件完成。

系统性能主要由精度、功耗、可靠性、速度、体积、重量、价格等技术指标来衡量。系统研制前，要根据需求调查结果给出的上述各指标来衡量系统性能。一旦这些指标被确定下来，整个系统将在这些指标限度下进行设计。系统的速度、体积、重量、价格、可靠性等指标会影响系统软、硬件功能的划分。系统功能尽可能用硬件完成，这样可提高系统的工作速度，但系统的体积、重量、功耗、硬件成本都相应增大，而且还增加了硬件所带来的不可靠因素。可用软件代替的硬件功能尽可能采用软件，以使系统体积、重量、功耗、硬件成本降低，并可提高硬件系统的可靠性，但可能会降低系统的工作速度。因此，在进行系统功能的软、硬件划分时，一定要依据系统性能指标综合考虑。

### 11.1.2 确定系统基本结构

单片机应用系统结构一般是以单片机为核心的，因此，系统中单片机选型、存储器分配、通道划分、输入/输出方式及系统中硬、软件功能划分等都对单片机应用系统结构有直接影响。

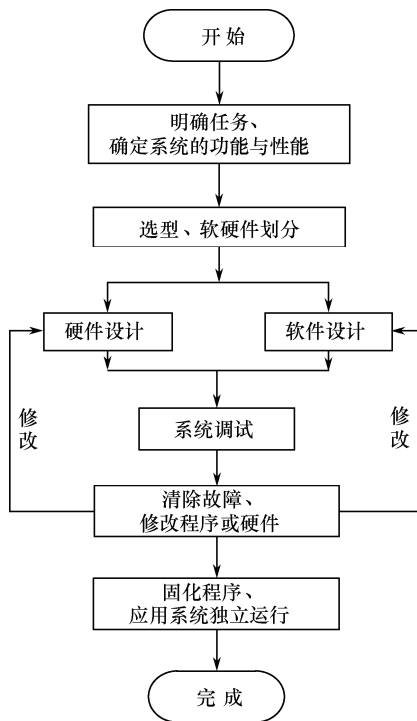


图 11.1 单片机应用系统设计的过程

## 1. 单片机选型

不同系列、不同型号的单片机内部结构、外部结构特征均不同，因此，在确定系统基本结构时，首先要选择单片机的系列或型号。选择单片机应考虑以下几个主要因素。

① 单片机性价比。应根据应用系统的要求和各种单片机的性能，选择最容易实现产品技术指标的机型，而且能达到较高的性价比。

② 开发周期。选择单片机时，要考虑具有新技术的新机型，更应考虑应用技术成熟、由较多软件支持、能得到相应单片机开发工具的比较成熟的机型。这样可借鉴许多现成的技术，移植一些现成软件，可以节省人力、物力，缩短开发周期。

在此需要特别指出的是，在选择单片机芯片时，一般选择内部不含 ROM 的芯片比较合适，通过外部扩展 EPROM 和 RAM 即可构成系统，这样不需专门的设备即可固化应用程序。另外，可以选择内部有 Flash 存储器的机型，Flash 存储器在不加电的情况下能长期保存信息，又能在在线进行擦除和重写。当设计的应用系统批量比较大时，可选择带 ROM、EPROM、OTP ROM 或 E<sup>2</sup>PROM 等的单片机，这样可使系统更加简单。通常的做法是在软件开发过程中采用 EPROM 型或 Flash 存储器芯片，而最终产品采用 OTP ROM 型芯片（一次性可编程 EPROM 芯片），这样可以提高产品的性价比。

## 2. 存储空间分配

不同的单片机具有不同的存储空间分布。8051 单片机的程序存储器与数据存储器空间相互独立，工作存储器、特殊功能存储器与内部数据存储器共享一个存储空间，I/O 端口则与外部数据存储器共享一个空间。8098 单片机的片内 RAM 程序存储区、数据存储区、I/O 端口全部使用同一个存储空间。总的来说，大多数单片机都存在不同类型的器件共享同一个存储空间的问题。因此，在系统设计时就要合理地系统中的各种部件分配有效的地址空间，以便简化译码电路，并使 CPU 能准确地访问到指定部件。

## 3. I/O 通道划分

设计中应根据包括对象所要求的输入/输出信号的数目及类型，确定整个应用系统的通道数目及类型。

## 4. I/O 方式的确定

不同的输入/输出方式，对系统的硬、软件要求是不同的。一般来说，无条件传送方式只适用于数据变化非常缓慢的外设，这种外设的数据可视为常态设计；中断方式处理器效率较高，但硬件结构稍复杂一些；查询方式硬件价格较低，但处理器效率比较低，速度比较慢。在一般的应用系统中，由于速度要求不高，控制对象也较少，此时，大多采用查询方式。

## 5. 软、硬件功能划分

在应用系统设计中，多用硬件来实现一些功能，这样可以提高利用率和系统的灵活性及适应性。相反，若用软件来实现某些硬件功能则可以节省硬件开支，提高灵活性和适应性，但速度要下降，软件设计费用和所需存储容量要增加。因此，在总体设计时，必须权衡利弊。

# 11.1.3 单片机应用系统硬件、软件的设计原则

## 1. 硬件系统设计原则

一个单片机应用系统的硬件电路设计包括两部分内容：一是单片机系统扩展，即单片机内部资源不能满足应用系统的要求时，必须在片外进行扩展；二是系统配置，即按照系统功能要求配置外围设备，如键盘、显示器、打印机、A/D 转换器、D/A 转换器等，设计合适接口电路。系统扩展和配置设计应遵循下列原则。

① 尽可能选择典型通用的电路,并符合单片机的常规用法,为硬件系统的标准化、模块化奠定良好的基础。

② 系统的扩展与外围设备配置的水平应充分满足应用系统当前的功能要求,并留有适当余地,便于以后进行功能的扩充。

③ 硬件结构应结合应用软件方案一并考虑。

④ 整个系统中相关的器件要尽可能做到性能匹配。例如,选用的晶振频率较高时,存储器的存取时间就短,应选择允许存取速度较快的芯片;选择 CMOS 芯片单片机构成低功耗系统时,系统中的所有芯片都应该选择低功耗产品。

⑤ 可靠性及抗干扰设计是硬件设计中不可忽视的一部分,具体包括芯片、器件选择、去耦合滤波、印制电路板布线、通道隔离等。

⑥ 单片机外接电路较多时,必须考虑其驱动能力。解决的办法是增强驱动能力,增加总线驱动器或者减少芯片功耗,降低总线负载。

## 2. 应用软件设计的原则

一个优秀的应用系统的软件应具有以下特点。

① 软件结构清晰、简洁,流程合理。

② 各功能程序实现模块化、系统化,这样既便于调试、连接,又便于移植、修改和维护。

③ 程序存储区、数据存储区规划合理,既能节约存储容量,又能给程序设计与操作带来方便。

④ 运行状态实现标志化管理。各个功能程序运行状态、运行结果及运行需求都设置状态标志以便查询,程序的转移、运行、控制都可以通过状态标志条件来控制。

⑤ 经过调试修改后的程序应进行规范化,除去修改“痕迹”。规范化的程序便于交流、借鉴,也为今后的软件模块化、标准化打下基础。

⑥ 实现全面软件抗干扰设计。软件抗干扰设计是计算机应用系统提高可靠性的有力措施。

⑦ 为了提高运行的可靠性,在应用软件中设置自诊断程序,在系统运行前先运行自诊断程序,用以检查系统各特征参数是否正常。

## 11.1.4 硬件设计

单片机应用系统的硬件设计主要包括下面几部分。

### 1. 程序存储器

若单片机内无程序存储器或存储容量不够,则需外部扩展程序存储器。外部扩展存储器通常选用 EPROM 或 E<sup>2</sup>PROM。EPROM 集成度高、价格便宜, E<sup>2</sup>PROM 则编程容易。当程序容量较小时,使用 E<sup>2</sup>PROM 较便宜;当程序量较大时,采用 EPROM 更经济。

### 2. 数据存储器

当片内数据存储区不够用时,才扩展外部数据存储器。

在存储容量满足的前提下,建议使用大容量的存储芯片以减少存储器芯片数目。

### 3. I/O 接口

I/O 接口大致可归类为并行接口、串行接口、模拟采集通道(接口)、模拟输出通道(接口)等。目前有些单片机已将上述各接口集成在单片机内部,使 I/O 接口的设计大大简化。系统设计时,可以选择含有所需接口的单片机。

### 4. 译码电路

当需要外部扩展电路时,就需要设计译码电路,译码电路要尽可能简单。



## 5. 总线驱动器

如果单片机外部扩展的器件较多，负载过重，就要考虑总线驱动器。比如，P0 口应使用双向数据总线驱动器（如 74LS245），P2 口可使用单向总线驱动器（如 74LS244）。

## 6. 抗干扰电路

针对可能出现的各种干扰，应设计抗干扰电路。其最简单的实现方式是在系统弱电部分（以单片机为核心）的电源入口对地跨接一个大电容（100 $\mu$ F 左右）与一个小电容（0.1 $\mu$ F 左右），在系统内部芯片的电源端对地跨接一个小电容（0.01~0.1 $\mu$ F）。

另外，可以采用隔音放大器、光电隔离器件抗共地干扰；采用差分放大器抗共模干扰；采用平滑滤波器抗白噪声干扰；采用屏蔽手段抗辐射干扰等。

要注意的是，在系统硬件设计时，要尽可能充分利用单片机的片内资源，使设计的电路向标准化、模块化方向靠拢。

## 11.1.5 软件设计

一个应用系统中的软件一般是由监控程序和应用程序两部分构成的。应用程序是用来完成诸如测量、计算、显示、打印、输出控制等各种实质性功能的软件；监控程序是控制系统按预定操作方式运行的程序，它负责组织调度各应用程序模块，完成系统自检、初始化、处理键盘命令、处理接口命令、处理条件触发和显示等功能。此外，监控程序还用来监视系统的运行状态。单片机应用系统中的软件一般是用高级语言与汇编语言混合编写的，编写程序时常常与输入、输出接口设计和存储器扩展交织在一起。

系统软件设计时，应根据功能要求，将系统软件分成若干个相对独立的部分，并根据它们之间的联系和时间上的关系，设计出合理的软件总体结构。通常在编制程序前，先根据系统输入和输出变量建立起正确的数学模型，然后画出程序流程框图。流程框图应结构清晰、简洁、合理。画流程框图时，还要对系统资源作具体的分配和说明。编制程序时，一般采用自顶向下的程序设计技术，先设计监控程序，再设计各应用程序模块。多功能程序应模块化、子程序化，这样不仅便于测试和连接，还便于修改和移植。

## 11.1.6 资源分配

单片机应用系统硬件资源分片内和片外两部分。片内资源依公司、类型的不同，其差别很大，当选定某种型号的单片机时，应充分利用片内的各种硬件资源。若片内资源不够使用，就需要在片外加以扩展。

## 11.1.7 单片机应用系统的开发

### 1. 单片机应用系统的仿真

单片机应用系统经过预研、总体设计、软/硬件开发、制版、元器件安装和代码下载（固化）后，多少会出现一些硬件、软件上的错误，这都需要调试来发现错误并纠正。通常，程序调试都需要借助被称为仿真系统或开发系统的专用工具来进行。一个单片机在线仿真器应具备的功能有：

- ① 能输入和修改应用程序；
- ② 能对用户系统硬件电路进行检查与诊断；
- ③ 将程序代码编译为目标码并固化或下载到系统中；
- ④ 能以单步、断点和连续方式运行程序，正确反映用户程序执行的中间结果；

⑤ 最好不占用用户单片机资源；

⑥ 提供足够的仿真 RAM 空间作为用户的程序存储器，并提供足够的 RAM 空间作为用户的数据存储器；

⑦ 齐全的软件开发工具，如交叉汇编、连接、固化和下载，甚至反编译等。

系统仿真调试的目的是检测并排除故障，检测并修正模块化软件。

对于一些小系统，也可以不使用专门的仿真器，而是直接采用写入装置，将目标代码写入到系统的程序存储器中。如果采用具有 Flash 存储器和支持 ISP 的单片机芯片，甚至只需要一个编程/下载电缆，利用专门的下载软件，就可以通过 ISP 插座将目标代码下载到具有 Flash 存储器的单片机芯片中，然后通过直接运行判断硬件/软件的正确性。

## 2. 单片机应用系统的制版

将设计的硬件电路通过 EDA（如 Protel 等）绘制原理图，并形成 PCB 制板图，最后检验无误后将 PCB 图交给制版公司，加工制造电路板。

## 3. 单片机应用系统的调试

单片机应用系统的调试包括硬件和软件调试两部分，但是它们并不能完全分开。一般的方法是先排除明显的硬件故障，再进行综合调试，排除潜在的软件、硬件故障。

### （1）静态硬件调试

将器件安装/焊接到电路板，进行系统调试前，应做好以下几方面的工作：

① 拿到电路板后，先检查加工质量，并确保没有任何制造方面的错误，如短路和断路，尤其要避免电源短路；

② 元器件在安装前要逐一检查；

③ 完成焊接后，应先空载上电（芯片座上不插芯片），并检查各引脚的电位是否正确。若一切正常，方可在断电的情况下将芯片插入，再次检查各引脚的电位及逻辑关系。

### （2）系统的调试

硬件的静态调试后，就可以进行系统的调试。一个经典的调试方案是：把整个应用系统按功能进行分块，如系统控制模块、A/D 模块和监控模块等。针对不同的功能模块，用测试程序并借助万用表、示波器及逻辑笔等来检测硬件电路的正确性。

## 4. 单片机应用系统的编程、下载与运行

① 应用程序编程。可采用多种形式编写应用源程序，如采用文本编写器、Keil C 等。

② 源程序的汇编。可采用编译程序和交叉编译程序进行汇编，并将其转换为目标文件。

③ 目标文件的下载与运行。调试完成后，将单片机应用系统设置到运行状态。可借助仿真器、编程器或是利用 ISP 的配套软件进行，将目标文件固化在程序存储器内，程序就开始自行运行了。

④ 经现场反复综合验证没问题后，将原理图、PCB 图、程序等生成最终的生产或发行版本，去除各类调试痕迹。

# 11.2 提高系统可靠性的一般方法

在实验室里设计的控制系统，在安装、调试后完全符合设计要求，但把系统置入现场后，系统常常不能够正常稳定地工作。产生这种情况的原因主要是现场环境复杂和各种各样的电磁干扰。

提高单片机系统可靠性的方法与措施很多。第一，尽量减少引起系统不可靠或影响系统可靠的外界因素，例如，为了抑制电源的噪声和环境干扰信号而采用的滤波技术、隔离技术、屏蔽技术等；第二，尽量提高系统自身抗干扰能力及降低自身运行的不稳定性，例如，针对系统

自身而采用的看门狗电路、软件抗干扰技术、备份技术等措施。其中第一类措施较常使用，其使用简单而且效果也较好，但其对系统可靠性的提高是有限的，许多情况下不能满足系统的要求。第二类措施的使用可以更进一步提高系统的可靠性，往往在高可靠性的系统设计中被广泛使用。

下面主要讲述针对单片机应用系统的干扰，介绍抑制干扰的方法及其他一些提高系统稳定性的方法。

### 11.2.1 电源干扰及其抑制

据统计，计算机应用的运行故障有 90% 以上是由电源噪声引起的。

#### 1. 交流电源干扰及其抑制

多数情况下，单片机运用系统都使用交流 220V、50Hz 的电源供电。在工业现场，生产负荷的经常变化，大型用电设备的启动与停止，往往要造成电源电压的波动，有时还会产生尖峰脉冲，这种高能尖峰脉冲的幅度在 50~4000V 之间，持续时间为几毫秒。它对计算机应用系统影响最大，能使系统的程序“跑飞”或使系统造成“死机”。因此，一方面要使系统尽量远离这些干扰源，另一方面要采用电源滤波器。这种滤波器是按频谱均衡原理设计的一种无源四端网络。为了提高系统供电的可靠性，还要采用交流稳压器，防止电源的过压和欠压。采用 1:1 隔离变压器，防止干扰通过初次级间的电容效应进入单片机供电系统。

#### 2. 直流电源抗干扰措施

##### (1) 采用高质量集成稳压电路单独供电

单片机应用系统中往往需要几种不同电压等级的直流电源，这时可以采用相应的低纹波高质量集成稳压电路。每个稳压电路单独对电压过载进行保护，因此不会因某个电路出现故障使整个系统遭到破坏，而且也减少了公共阻抗的互相耦合，从而使供电系统的可靠性大大提高。

##### (2) 采用直流开关电源

直流开关电源是一种脉宽调制型电源。它甩掉了传统的工频变压器，具有体积小、重量轻、效率高、电网电压范围宽、变化时不易输出过电压和欠电压的特点，在计算机应用系统中应用非常广泛。这种电源一般都有几个独立的电压输出，如  $\pm 5V$ 、 $\pm 12V$ 、 $\pm 24V$  等，电网电压波动范围可达 220V 的  $-20\% \sim +10\%$ ，同时，直流开关电源还具有较好的初、次级隔离作用。

##### (3) 采用 DC-DC 变换器

如果系统供电电网波动较大，或者精度要求高，可以采用 DC-DC 变换器。DC-DC 变换器的特点是输入电压范围大、输出电压稳定且可调整、效率高、体积小，有多种封装形式，在单片机应用系统中获得了广泛地应用。

### 11.2.2 地线干扰及其抑制

接地问题处理的正确与否，将直接影响系统的正常工作。

#### 1. 一点接地和多点接地的应用

在低频电路中，布线和元件间的寄生电感影响不大，因而常采用一点接地，以减少地线造成的地环路。在高频电路中，布线和元件间的寄生电感及分布电容将造成各接地线间的耦合，影响比较突出，此时应采用多点接地。

通常频率小于 1MHz 时，采用一点接地；频率高于 10MHz 时，采用多点接地；频率处于 1~10MHz 之间时，若采用一点接地，其地线长度不应超过波长的 1/20。否则，应采用多点接地。

#### 2. 数字地与模拟地的连接原则

数字地是指数字逻辑电路的接地端，以及 A/D、D/A 转换器的数字地。模拟地是指放大器、

取样保持器和 A/D、D/A 中模拟信号的接地端。在单片机系统中，数字地和模拟地应分别接地。即使是一个芯片上有两种地，也要分别接地，然后在一点处把两种地连接起来，否则，数字回路通过模拟电路的地线再返回到数字电源，将会对模拟信号产生影响。

### 3. 印制电路板的地线分布原则

TTL、CMOS 器件的接地线要呈辐射网状，避免环形；板上地线的宽度要根据通过的电流大小而定，最好不小于 3mm。在可能的情况下，地线尽量加宽；旁路电容的地线不要太长；功率地通过电流信号较大，地线应较宽，必须与小信号地分开。

### 4. 信号电缆屏蔽层的接地

信号电缆可以采用双绞线和多芯线，又有屏蔽和无屏蔽两种情况。双绞线具有抑制电磁干扰的作用，屏蔽线具有抑制静电感应干扰的作用。

对于屏蔽线，屏蔽层最佳的接地点是在信号源侧（一点接地）。

## 11.2.3 其他提高系统可靠性的方法

### 1. 硬件抗干扰设计

① 选择抗干扰性能强的 CPU。不同型号单片机的抗干扰能力是不一样的。如果你的产品是工作在干扰比较大的环境，可以选用抗干扰能力强的单片机。

② 数字量的光电隔离。单片机的输入/输出口线是最容易引进干扰的地方；对于不使用的 I/O 口线，需要使用电阻上拉到高电平，不可悬空。直接将开关量信号接到单片机的口线上，是最不可取的设计；至少要加一个缓冲驱动的芯片隔离，而且这个芯片要与 CPU 尽量近；在严重干扰的情况下，需要将所有的口线采用光耦光电隔离。光耦隔离就是采用电流环路传输，避免在长线传输的时候，在传输线上积累高压和感应信号，使得数据紊乱甚至损坏 TTL 接口芯片，或者干扰单片机的正常运行。注意，采用光电隔离是为了信号使用电流环路传输，而不是使用 TTL 电平传输，这意味着，从 CPU 模块的角度看，开关量输出、驱动器件，如 74LS244/245/07 等，在 CPU 模块这里，光耦在另外一块电路板处；开关量输入，光耦在 CPU 模块处，而驱动器件在另外一块电路板处；这样才能形成电流环路。数字信号的电流环路的电流一般在 5~10mA，根据光耦的指标而定。在工业环境下与 CPU 模块相对独立的键盘，需要使用光耦接入系统中，否则极易损坏接口芯片。

③ 模拟量的光电隔离。模拟量隔离有两种方法：一种是使用线性光耦隔离模拟量；由于线性光耦的价格昂贵，并且线性区也很窄，不推荐使用。比较常用的办法是：选用 SPI 接口，或者 3 线接口的 A/D 或者 D/A，把数据、时钟和使能信号使用光耦隔离。这实际上是把模拟量的信号转换成串行的开关量的数据流传输。另一种是使用 4~20mA 的电流环路，但是 4~20mA 的芯片价格比较昂贵，而且电路也复杂。

④ 模拟量的通信传输。使用一个 CPU，把模拟量读入到 CPU，再通过 RS-485 接口把数据按照通信协议，传输到主 CPU 模块；当然，也可以传输开关量信号等。实际上，这是一个分布式的测控网络的方法，多板的单片机测控系统经常使用这种方法。

⑤ 独立的“看门狗”，选用独立的“看门狗”作为系统复位信号产生。当系统跑飞时，由于没有“喂狗”，“看门狗”产生复位信号，使得系统可以最大限度地找回跑飞前的数据，尽可能重新开始平稳地运行。

⑥ 采用 RS-232 电平传输。比如机箱的面板显示，经常采用 MAX7219，这时如果使用 TTL 电平，就会经常被干扰使得显示不正常，此时可以在发送端使用一片 MAX232，将 TTL 电平转换成 RS-232 电平。在面板显示电路板选用一片 MC1489，将 RS-232 电平转换成 TTL 电平，加强驱动能力，就可以保证信号正确传输。

⑦ 采用 RS-422 电平传输。同样,也可以在发送端采用一片 MAX485,将 TTL 电平转换成 RS-485 电平,在接收端,选用一片 MAX485,将 RS-485 电平转换成 TTL 电平,就可以保证信号正确传输。

## 2. 单片机软件抗干扰

软件抗干扰研究的内容主要是:①消除模拟输入信号的噪声(如数字滤波技术);②程序运行混乱时使程序进入正轨的方法。这里针对后者提出几种有效的软件抗干扰方法。

### (1) 指令冗余技术

单片机 CPU 取指令过程是先取操作码,再取操作数。当 PC 受干扰出现错误,程序便脱离正常轨道“乱飞”,当“乱飞”到某双字节指令,若取指令时刻落在操作数上,误将操作数当作操作码,程序将出错。若“飞”到了三字节指令,出错概率更大。在关键地方人为插入一些单字节指令,或将有效单字节指令重写成为指令冗余。通常是在双字节指令和三字节指令后插入两个字节以上的 NOP。这样即使“乱飞”程序飞到操作数上,由于空操作指令 NOP 的存在,避免了后面的指令被当作操作数执行,程序自动纳入正轨。此外,对系统流向起重要作用的指令如 RET、RETI、LCALL、LJMP、JC 等之前插入两条 NOP,也可将“乱飞”程序纳入正轨,确保这些重要指令的执行。

### (2) 软件锁、程序陷阱技术

当系统在干扰信号的作用下发生程序跑飞时,程序指针有可能指向两个区域:一种可能正好转到程序区的其他地址进行执行,另一种可能转移到程序空间的盲区进行执行。所谓盲区,就是说那里并没有存放有效的程序指令。对于第一种情况,可以采取软件锁加以抑制。在软件锁设计中,对于每个相对独立的程序块在其执行以前或执行中对一个预先设定好的密码进行校验,只有当这一密码相符时才有效;否则,会根据校验错而使程序强制发生转移。如下面的实例:假设有顺序执行的 3 个程序块,每个程序块执行时都对其设定的密码进行校验。

```
SPRO1:  PUSH  ACC
        MOV   A,#N-CODE1
        CJNE  A,SAFE-CODE,ERROR1
        POP   ACC
        ...
        ;块处理程序部分(此处省略)
        MOV   SAFE-CODE,#N-CODE2
        SJMP  SPRO2
ERROR1:  POP   ACC
        ...
        ;错误处理程序部分(此处省略)
SPRO2:  PUSH  ACC
        MOV   A,#N-CODE2
        CJNE  A,SAFE-CODE,ERROR2
        POP   ACC
        ...
        ;块处理程序部分(此处省略)
        MOV   SAFE-CODE,#S-CODE3
        SJMP  SPRO3
ERROR2:  POP   ACC
        ...
        ; 错误处理程序部分(此处省略)
SPRO3:  PUSH  ACC
        MOV   A,#N-CODE3
```

```

CJNE  A,SAFE-CODE,ERROR3
POP  ACC
...                               ;块处理程序部分(此处省略)
MOV  SAFE-CODE,#N-CODE4
SJMP  SPRO4
ERROR3: POP  ACC
...                               ; 错误处理程序部分(此处省略)

```

程序陷阱是指用来将捕获的“乱飞”程序引向复位入口地址（一般为 0000H）的指令，这主要是为了防止程序跑到盲区。一般情况下，程序代码空间以外的 ROM 空间被全写为 1 或全写为 0，程序跳入这一区域将不可控。假设某系统程序空间为 32KB，程序编译后共生成 18KB 的代码，那么，还有 14KB 的程序空间未被使用，可以在该区域放置下面的陷阱程序：

```

NULL-PRO:  NOP
           NOP
           ...
           LJMP  0000H
           ...

```

用上面程序段重复覆盖剩余的 program 空间，陷阱程序里的每一段 NOP 指令的多少对于捕获的成功率及捕获的时间有影响。NOP 指令放置的越多捕获的成功率就越高，但花费的时间就越长，程序失控的时间也越长；否则，情况则相反。因为只有程序跳转到 NOP 指令或 LJMP 指令的首个字节时，才能成功捕获；当程序跳到 LJMP 指令的后两个字节时，可能会出现不可预知的执行结果。

在用户程序区各模块之间的空余单元也可填入陷阱指令。当未使用的中断因干扰而开放时，在对应的中断服务程序中设置程序陷阱，能及时捕获错误的中断。如某应用系统虽未用到外部中断 1，外部中断 1 的中断服务程序可为如下形式：

```

NOP
NOP
RETI

```

返回指令可用 RETI，也可用 LJMP 0000H。

### （3）软件“看门狗”技术

软件看门狗（Watchdog）也叫作程序运行监视系统。当程序运行受到干扰，程序飞到一个临时构成的死循环中时，软件陷阱也无能为力了，这时就需要人工复位或硬件复位；采用软件看门狗技术同样也能使系统复位。

当程序陷入死循环后，定时器溢出，产生高优先级中断，从而跳出死循环。还可以在定时器中断服务程序中放置一条 LJMP ERR 指令，即可使程序转向出错处理程序。

以下是一个用定时/计数器 T0 作软件看门狗的 program：

```

           ORG  0000H
           AJMP  MAIN
           ORG  000BH
           LJMP  ERR
MAIN:      MOV  SP,#60H
           MOV  PSW,#00H
           MOV  SCON,#00H
           MOV  TMOD,#01H      ;设置 T0 为 16 位定时器

```

```

        SETB  ET0           ;允许 T0 中断
        SETB  PT0           ;设置 T0 中断为高级中断
        MOV   TL0,#00H      ;设定 T0 的定时初值,定时时间约为 16ms(6MHz 晶振)
        MOV   TH0,#0B0H
        SETB  EA            ;开中断
        SETB  TR0           ;启动 T0
LOOP:    ...                ;主程序开始
        LCALL WATCH DOG    ;调用喂狗子程序
        ...
        LJMP  LOOP
WATCH DOG: MOV   TL0,#00H    ;喂狗子程序
        MOV   TH0,#0B0H
        SETB  TR0
        RET
ERR:     POP   ACC           ;定时器中断
        POP   ACC           ;看门狗软件复位程序
        CLR   A
        PUSH  ACC
        PUSH  ACC
        RETI

```

在程序中，由于执行了中断服务程序，PC 的指针已经指向 0000H，从而实现了软件复位的目的。

#### (4) 系统故障处理、自恢复程序的设计

单片机系统因干扰复位或掉电后复位均属非正常复位，应进行故障诊断并能自动恢复非正常复位前的状态。程序的执行总是从 0000H 开始，导致程序从 0000H 开始执行有 4 种可能：系统开机上电复位；软件故障复位；看门狗超时未喂狗硬件复位；任务正在执行中掉电后来电复位。4 种情况中除第一种情况外均属非正常复位，需加以识别。

##### ① 硬件复位与软件复位的识别

此处硬件复位指开机复位与看门狗复位，硬件复位对寄存器有影响，如复位后 PC=0000H，SP=07H，PSW=00H 等；而软件复位则对 SP、PSW 无影响。故对于微机测控系统，当程序正常运行时，将 SP 设置地址大于 07H，或者将 PSW 的第 5 位用户标志位在系统正常运行时设为 1。那么系统复位时只需检测 PSW.5 标志位或 SP 值便可判此是否是硬件复位。图 11.2 是采用 PSW.5 作上电标志位判别硬、软件复位的程序流程图。

此外，由于硬件复位时片内 RAM 状态是随机的，而软件复位片内 RAM 则可保持复位前状态，因此可选取片内某一个或两个单元作为上电标志。设 40H 用来作上电标志，上电标志字为 78H，若系统复位后 40H 单元内容不等于 78H，则认为是硬件复位，否则认为是软件复位。若用两个单元作上电标志，可靠性更高。

##### ② 开机复位与看门狗故障复位的识别

开机复位与看门狗故障复位因同属硬件复位，所以要想予以正确识别，一般要借助非易失性 RAM 或 E<sup>2</sup>PROM。当系统正常运行时，设置一可掉电保护的观测单元。当系统正常运行时，在定时喂狗的中断服务程序中使该观测单元保持正常值（设为 AAH），而在主程序中将该单元清 0，因观测单元掉电可保护，则开机时通过检测该单元是否为正常值可判断是否是看门狗复位。

### ③ 正常开机复位与非正常开机复位的识别

如某个以时间为控制标准的测控系统，完成一次测控任务需 1 小时。在已执行测控 50 分钟的情况下，系统电压异常引起复位，此时若系统复位后又从头开始进行测控，则会造成不必要的时间消耗。因此可通过一监测单元对当前系统的运行状态、系统时间予以监控，将控制过程分解为若干步或若干时间段，每执行完一步或每运行一个时间段则对监测单元置为关机允许值，不同的任务或任务的不同阶段有不同的值，若系统正在进行测控任务或正在执行某时间段，则将监测单元置为非正常关机值。那么系统复位后可据此单元判别系统原来的运行状态，并跳到出错处理程序中恢复系统原运行状态。

### ④ 非正常复位后系统自恢复运行的程序设计

对顺序要求严格的一些过程控制系统，系统非正常复位与否，一般都要求从失控的那一个模块或任务恢复运行。所以测控系统要做好重要数据单元、参数的备份，如系统运行状态、系统的进程值、当前输入/输出的值、当前时钟值、观测单元值等，这些数据既要定时备份，同时若有修改也应立即予以备份。

当在已判别出系统非正常复位的情况下，先要恢复一些必要的系统数据，如显示模块的初始化、片外扩展芯片的初始化等。其次再对测控系统的系统状态、运行参数等予以恢复，包括显示界面等的恢复。之后再把复位前的任务、参数、运行时间等恢复，再进入系统运行状态。如图 11.3 所示。

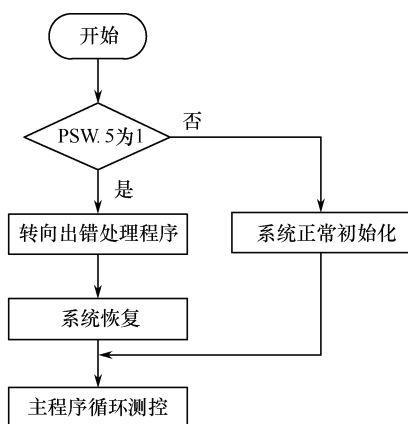


图 11.2 硬、软件复位识别流程图

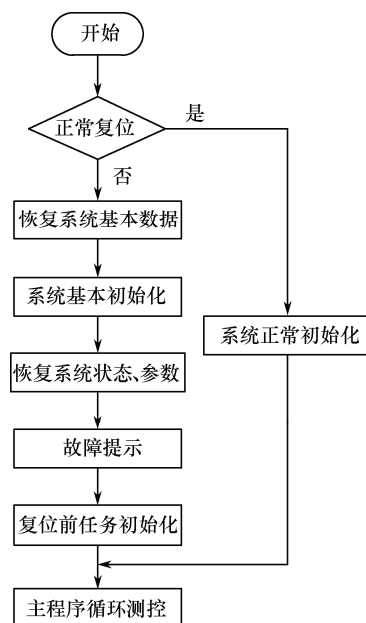


图 11.3 系统自恢复程序流程图

## 3. 采用备份系统提高可靠性

备份系统在许多重要控制系统中已被广泛使用，备份系统分为在线备份系统和后备备份系统。对于在线备份系统，系统中的两个 CPU 均处于工作状态，有可能两个 CPU 处在对等的位置，也可能一个处在主 CPU 的位置，而另一个处在从 CPU 的位置。在对等的情况下，两个 CPU 共同决定系统对外的操作，任何一个 CPU 出错都将引起对外操作的禁止。对于一主一从的情况，往往是主 CPU 负责系统控制逻辑的实现，而从 CPU 负责对主 CPU 的工作状态进行监控。当监控到主 CPU 工作异常时，从 CPU 通过强行复位主 CPU 等操作使主 CPU 恢复正常，同时，为



确保从 CPU 工作正常，从 CPU 的工作状态也被主 CPU 监控；当从 CPU 的工作状态不正常时，主 CPU 也可采取措施使从 CPU 恢复正常工作，即实现互相监控的目的。

## 11.3 设计与制作实例

### 11.3.1 单片机兴趣实验板设计与制作

#### 1. 设计任务

针对本课程的开设，我们设计一款基于 MCS-51 单片机的学习板，它针对单片机初、中级学习者，提供一个帮助用户快速开始单片机学习之旅的硬件平台。本单片机学习板能进行单片机基本资源实验，具有以下特点：

- 单片机支持 ISP 下载，采用 DIP40 的 IC 锁紧座，可随时更换 DIP40 封装的 MCS-51 单片机；
- 含 USB RS-232 转换电路，可直接由 USB 线进行 ISP 程序下载；
- I/O 全部引出，便于扩展；
- 直接用 USB 线供电。

#### 2. 总体设计方案

系统主要由单片机、按键、数码显示、蜂鸣器、LED 显示、USB RS-232 转换电路组成，结构框图如图 11.4 所示。

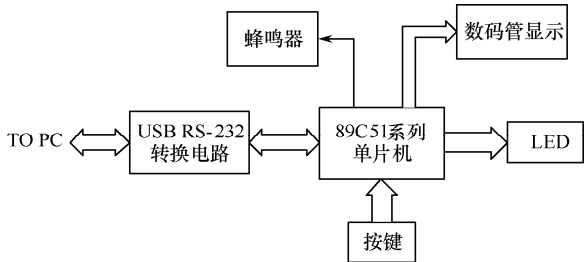


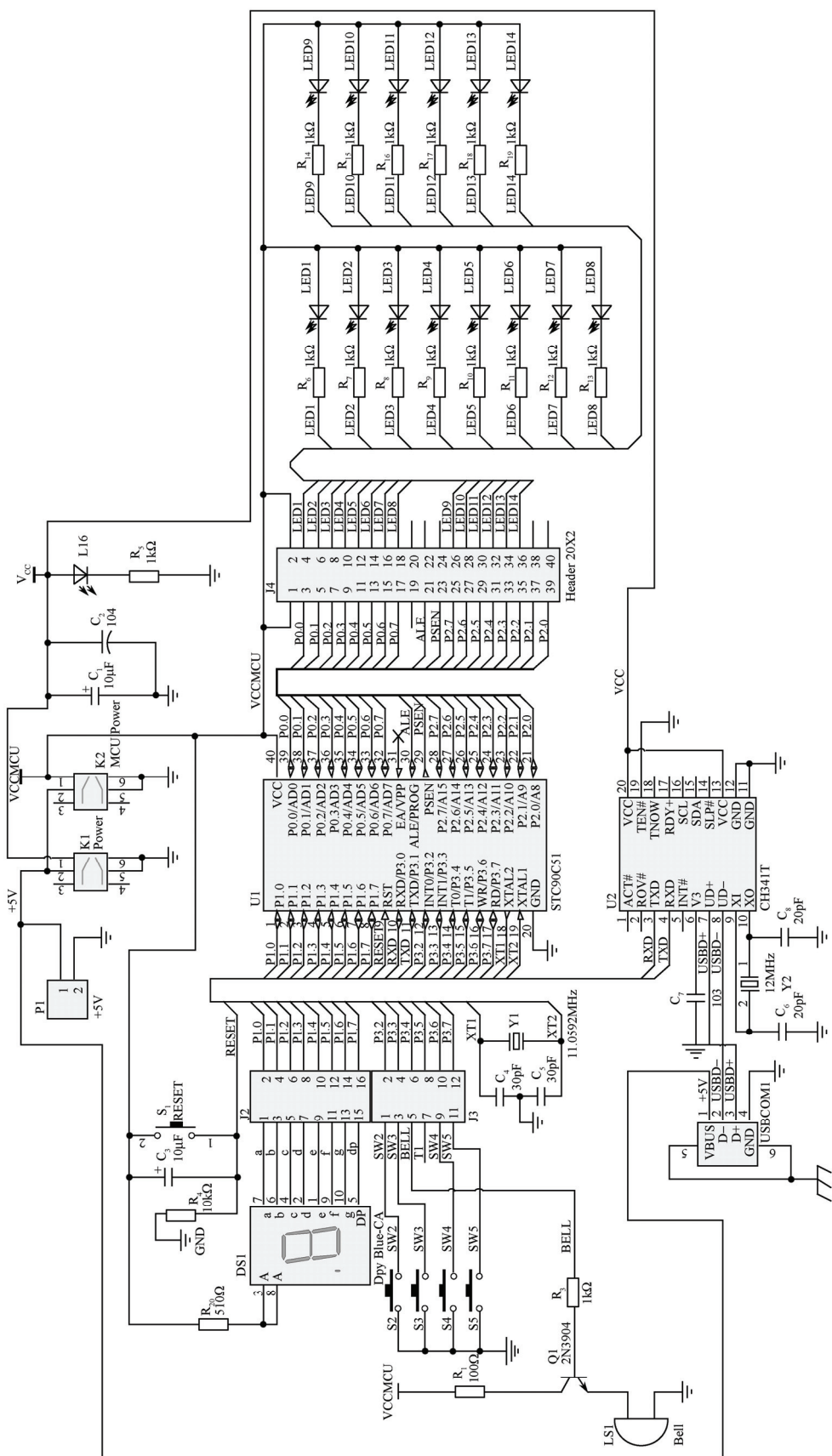
图 11.4 单片机兴趣板结构框图

单片机选用 STC90C51 系列单片机，其内部有 256~4352 字节的 SRAM、4~61KB 内部 Flash 程序存储器，除 P0~P3 口外还有 P4 口（PLCC 封装），片内自带 8 路 8 位 A/D（AD 系列），片内自带 E<sup>2</sup>PROM，片内自带看门狗、双倍速、双数据、内置复位等。最重要的是 STC 单片机支持 ISP、IAP，可以通过单片机串口直接下载程序，调试方便，无须编程器。

现在很多计算机已没有串口，为了方便使用，所以增加了一个 USB RS-232 转换电路，选用 CH341 进行 USB 与串口的数据转换。CH341 是一个 USB 总线的转接芯片，通过 USB 总线提供串口、打印口或者并口。在串口方式下，CH341 提供串口发送使能、串口接收就绪等交互式的速率控制信号以及常用的 Modem 联络信号，用于将普通的串口设备直接升级到 USB 总线。在打印口方式下，CH341 提供了兼容 USB 相关规范和 Windows 操作系统的标准 USB 打印口，用于将普通的并口打印机直接升级到 USB 总线。通过转换电路，该实验板只需一根 USB 线结合 STC 公司的 ISP 软件，即可实现 PC 与单片机串口通信及下载单片机程序功能。

#### 3. 硬件设计

系统的硬件电路包括主机、USB 转串口电路、按键、蜂鸣器、显示及 I/O 扩展 6 个部分，电路原理图如图 11.5 所示。



系统除单片机串行口外，单片机的所有 I/O 均通过短线帽连接，这样方便扩展外接硬件。  
图 11.6 为本实验板的实物图。

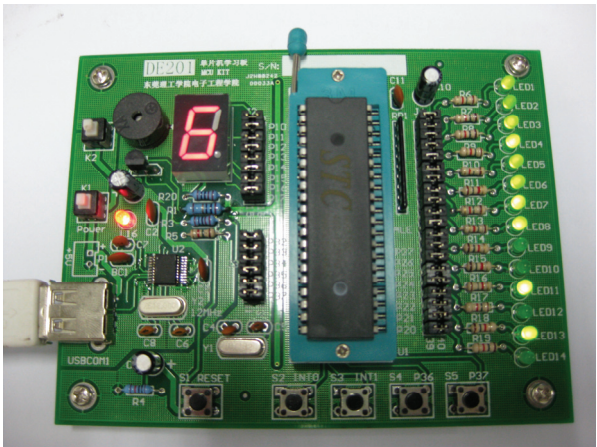


图 11.6 单片机入门学习板实物图

4. 软件设计

为了检测学习板的硬件是否能正常工作，我们编写了一个整机测试程序，整机测试程序流程如图 11.7 所示。

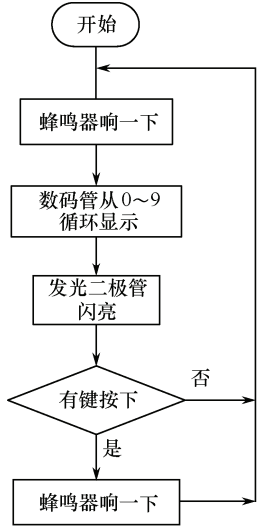


图 11.7 学习板测试程序流程图

关于实验项目更多的具体内容，请访问单片机精品课程网：<http://jpkc.dgut.edu.cn/mcu>。

11.3.2 用 DS18B20 温度传感器进行温度测量

1. 设计任务要求

设计一个温度测量系统，要求测温系统简单、测温精度高、连接方便、占用口线少，测温范围为-55~+125℃，在-10~+85℃范围内，测温精度为±0.5℃，两位温度显示。

2. 总体方案及硬件设计

① 采用两位八段数码管显示温度，单片机的 P0 口控制数码管的段码显示，P2.0~P2.1 则控制数码管的位选择。

② 温度传感器采用 Dallas 公司的数字化温度传感器 DS18B20。DS18B20 支持 1-Wire 接口，支持 3~5.5V 的电压范围，测量温度范围为-55~+125℃，在-10~+85℃范围内，精度为±0.5℃，可以程序设定 9~12 位的分辨率及报警温度。分辨率设定、用户设定的报警温度存储在 E<sup>2</sup>PROM 中，掉电后依然保存。DS18B20 是世界上第一片支持 1-Wire 接口的温度传感器。每片 DS18B20 内部有唯一的 64bit 识别码，1-Wire 独特且经济的特点，使用户可轻松地组建传感器网络，为测量系统的构建引入全新概念。

DS18B20 具有体积小、适用电压宽、性价比高等特点，现场温度直接以 1-Wire 的数字方式传输，大大提高了系统的抗干扰性。适合于恶劣环境的现场温度测量，如环境控制、设备或过程控制、测温类消费电子产品等。DS18B20 有 TO-92、TSOC、SOIC 三种封装，图 11.8 为 DS18B20 的封装引脚图。DQ 为数字信号输入/输出端；GND 为电源地；V<sub>DD</sub> 为外接供电电源输入端（在寄生电源接线方式时接地）。

③ 采用轻触按键来实现数据的设置功能，按键由单片机的 P1 口控制。

根据系统设计要求及选择的器件组成的温度测量系统的框图如图 11.9 所示。电路原理如图 11.10 所示，图中的单片机采用 MCS-51 系列的 STC89C51 单片机。

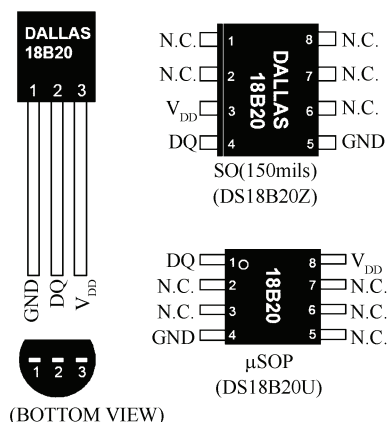


图 11.8 DS18B20 的封装引脚图

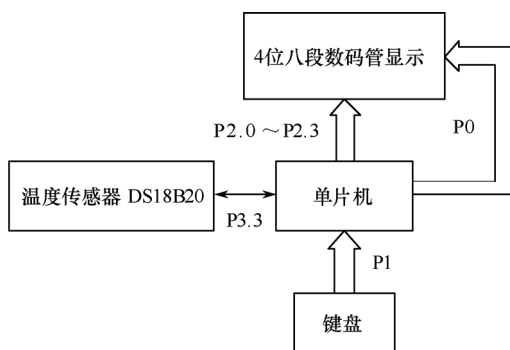


图 11.9 温度测量系统电路框图

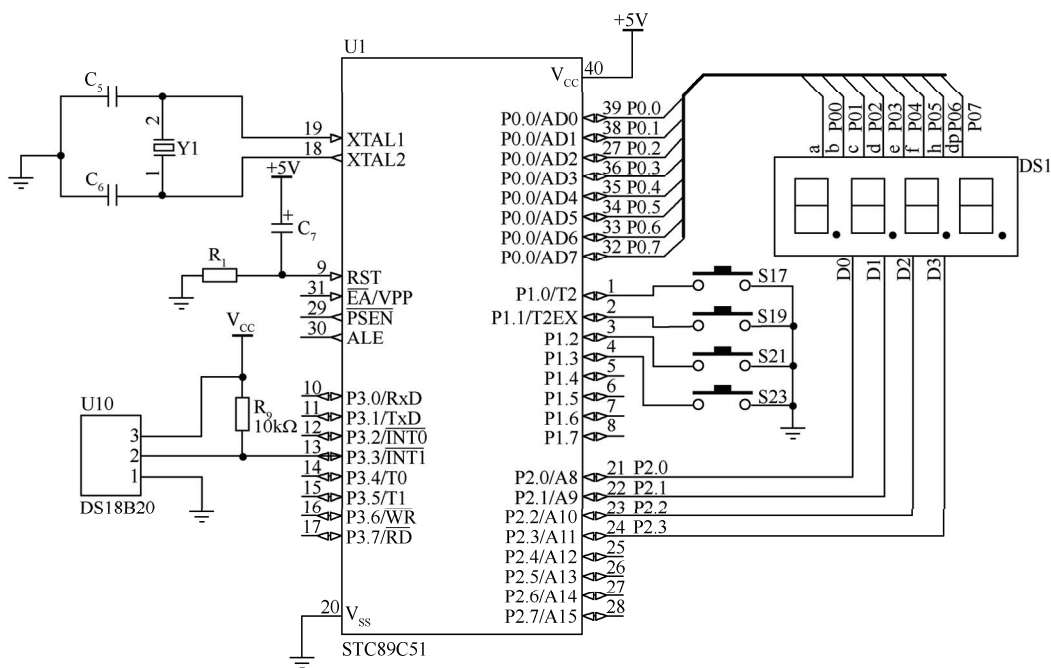


图 11.10 温度测量系统电路图

### 3. 软件设计

温度测量系统的流程如图 11.11 所示。

关于详细的设计资料及测试程序，请访问单片机精品课程网：<http://jpkc.dgut.edu.cn/mcu>。

## 11.3.3 电子密码锁设计

### 1. 设计要求

- ① 本设计为了防止密码被窃取，要求输入密码时在 LED 屏幕上显示\*号。
- ② 设计开锁密码为 8 位，密码由数字 0~9 和字母 A, B 组成。
- ③ 当输入密码正确时，开锁（继电器闭合），绿灯亮，红灯灭，发出“叮咚”声，并在 LED

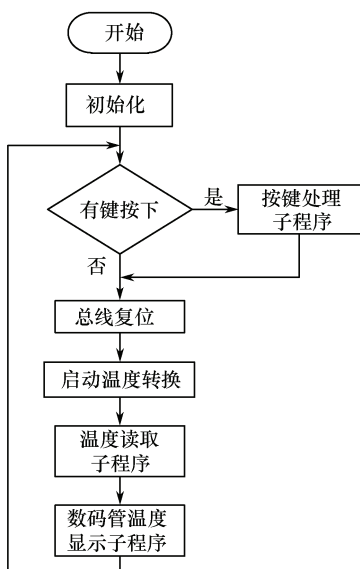


图 11.11 温度测量系统软件流程图

屏幕上显示汉字“密码正确”；当密码错误时，保持继电器断开，红灯亮，发出“嘟嘟”的错误提示音，并在 LED 屏幕上显示汉字“密码错误”。

④ 实现连续输入密码错误超过限定的 5 次后，密码锁锁定，并发出尖锐的报警声。

⑤ 4×4 的矩阵键盘包括 0~9 数字、字母 A, B 和 4 个功能键盘（修改密码键、撤销键、确定键和取消/返回键）。

⑥ 密码可以由用户自己修改设定，修改密码必须输入原密码。然后输入两次新密码，如果两次输入的新密码不相同，仍保持原密码，这主要是防止在输入新密码时出现误操作。

⑦ 建立声音系统，在密码正确、密码错误、按下键盘、电子锁锁死时都有相应的声音产生。

## 2. 系统设计

系统的整体设计方案如下：液晶显示器采用 128×64 点阵型液晶显示器 LGM12641BS1R，这与前面介绍的 MGLS12864 液晶显示器的控制功能完全相同。外部存储器采用 25C040，它是容量为 4KB 的 E<sup>2</sup>PROM，采用 SPI 总线进行

命令和数据的传送。密码锁系统设计框图如图 11.12 所示。

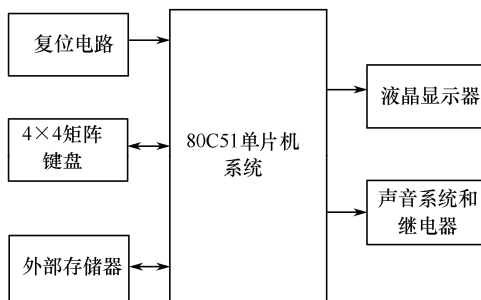


图 11.12 密码锁系统设计框图

下面介绍各个子系统的设计（复位电路略去），硬件设计见图 11.13 仿真图。

### （1）4×4 矩阵键盘电路

从图 11.13 键盘电路中，除了数字键 0~9 和字母键 A, B 外，还有 4 个功能键盘，分别为：设置密码键、撤销操作键、确定键和取消/返回键。其中，密码设置键用来修改当前的密码，修改前要输入原密码，在输入原密码正确的情况下才能输入新密码。输入新密码时，为了防止误操作带来新密码不确定的问题，要求输入两次新密码，两次输入的新密码要一致才能修改密码；撤销操作键可以删除最近输入的密码，并在 LCD 上显示；取消/返回键是取消当前操作，返回主菜单。4×4 矩阵键盘接在 P1 口上。

### （2）液晶显示电路

液晶显示器的 8 位数据线接在 P0 口上，其中控制线的情况是：P3.0 控制 E，P3.1 控制 CS<sub>2</sub>，P3.2 控制 CS<sub>1</sub>，P3.3 控制 R/ $\overline{W}$ ，P3.4 控制 D/I。

### （3）外部存储器电路

由于采用的 25C040 是采用 SPI 总线，因此只需要 4 根线就可以和单片进行连接了，其中 P2.0 连接 SCK，P2.1 连接 SI，P2.2 连接 SO，P2.3 连接  $\overline{CS}$ 。





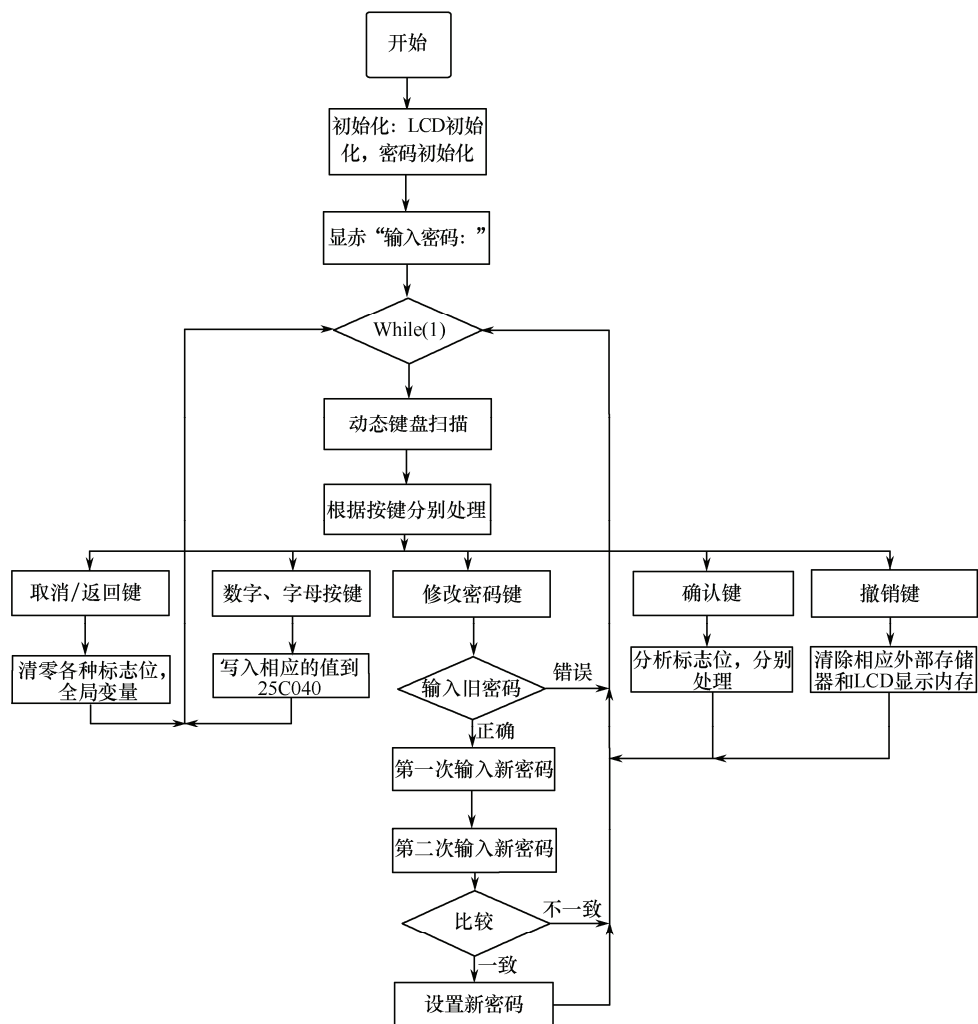


图 11.14 密码锁系统软件流程图

77H 单元。当修改新密码时，第一次输入的密码存储在 80H~87H 单元，第二次输入的密码存储在 70H~77H 单元。设置完新密码后，70H~77H、80H~87H 全部清除。

② 设置了一个全局变量记录密码错误的次数，当连续输入 5 次错误密码(包含修改密码时，旧密码输入错误)，电子锁锁定，蜂鸣器报警，且红色 LED 闪烁，程序陷入死循环。

③ 程序中还设计了非常多的标志位，这是因为确定键是一个复用按键，它对应非常多的功能，如何区分这些功能就依靠这些标志位来决定，从而进入各自对应的处理子程序。

④ 整个程序中包含 4 种声音：报警音，按键音，密码正确开锁音（叮咚声），密码错误提示音，每个声音都由定时/计数器 0 来定时产生不同频率的方波来发声。关于不同的频率发出什么声音可参考相关资料。

⑤ 每次输入密码，都需要输满 8 位，当未输满 8 位密码时，按确定键，都会转回到当前输入密码的界面（同时清除已经输入的密码）。如第一次输入新密码时，未输满 8 位，按确定键，会在提示后，返回第一次输入新密码的界面。其他情况下类似。

⑥ 撤销键会清除 25C040 指定的单元的密码值，同时也会清除 LCD 上指定显示内存的显示值。其中，25C040 是写 0xff 清除，而 LCD 显示内存的清除是写 0x00。

⑦ 取消/返回键，会清除所有的全局变量、标志位、除了密码保存单元外的所有的外部存储单元，然后返回主界面。

通过 Proteus 仿真的参考程序在“程序附件”中，请登录华信教育资源网 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn) 下载。

## 本章小结

本章主要介绍了单片机应用系统设计过程，提高应用系统可靠性的途径和方法，并通过单片机兴趣板、温度测量控制系统、电子密码锁设计等设计实例，详细介绍了单片机系统设计的总体方案设计方法、软硬件设计的具体方法，并给出了与之对应的部分程序。

## 思考题及习题

- 11.1 简述单片机应用系统设计的一般方法及步骤。
- 11.2 简述单片机应用系统设计中软、硬件设计原则。
- 11.3 单片机应用系统软、硬件设计应注意哪些问题？
- 11.4 单片机应用系统硬件设计的基本任务是什么？
- 11.5 在单片机应用系统设计中，硬件调试的基本步骤是什么？
- 11.6 在单片机应用系统设计中，有哪些常见的可靠性设计内容？
- 11.7 简述单片机应用系统软件设计的主要步骤和方法。
- 11.8 简述单片机应用系统的调试步骤和方法。
- 11.9 按照单片机应用系统设计的一般方法和步骤，设计一个函数发生器，并写出完整的设计报告。



# 第 12 章 微处理器及微机系统

## 12.1 微处理器概述

### 12.1.1 微处理器发展简介

1978 年，英特尔公司生产了第一个 16 位的微处理器 8086，这是第三代微处理器的起点。8086 微处理器最高主频速度为 8MHz，具有 16 位数据通道，内存寻址能力为 1MB。

1979 年，英特尔公司又开发出了 8088。8086 和 8088 在芯片内部均采用 16 位数据传输，所以称为 16 位微处理器。8088 采用 40 引脚的 DIP 封装，工作频率为 6.66MHz、7.16MHz 或 8MHz，微处理器集成了大约 29000 个晶体管。

1981 年，美国 IBM 公司将 8088 芯片用于其研制的 IBM-PC 中，从而开创了全新的微机时代。也正是从 8088 开始，个人计算机（PC）的概念开始在全世界范围内发展起来。从 8088 应用到 IBM PC 上开始，PC 真正走进了人们的工作和生活之中，它也标志着一个新时代的开始。

### 12.1.2 微处理器的结构

Intel 8086 微处理器是第三代微处理器中的代表，具有 16 根数据线和 20 根地址线，可寻址的内存空间为 1MB，具有 16 位数据处理能力，也支持 8 位数据处理。

8086 微处理器主要由执行单元 EU(Execution Unit)和总线接口单元 BIU(Bus Interface Unit)组成，其功能框图如图 12.1 所示。图中虚线右半部分是 BIU，左半部分是 EU。两者并行操作，提高了 CPU 的运行效率。

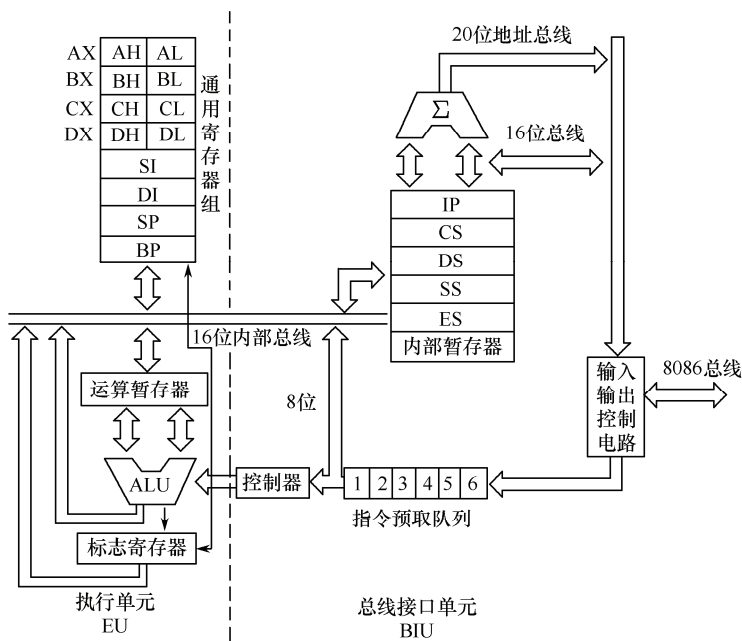


图 12.1 8086CPU 内部结构

1. 指令执行单元 EU

指令执行单元 EU 的功能是从 BIU 的指令队列头部取指令，然后完成指令的译码和执行，同时管理 CPU 内部的相关寄存器。EU 由一个 16 位的算术逻辑单元（ALU）、16 位的标志寄存器、8 个 16 位通用寄存器，以及数据暂存器和 EU 控制器等组成。

2. 总线接口单元 BIU

BIU 是 8086 微处理器与存储器、I/O 设备之间的接口部件，根据 EU 的请求，完成 CPU 与内存、外设之间的所有总线操作。

总线接口单元 BIU 主要由 4 个段寄存器、1 个指令指针寄存器、1 个与 EU 通信的内部寄存器、先入先出的指令队列、总线控制逻辑和计算 20 位物理地址的地址加法器组成。

指令执行单元 EU 和总线接口单元 BIU 是两个相互独立的硬件单元，可独立并行工作，大部分的取指令和执行指令可以重叠进行，大大减少了等待取指令的时间，提高了微处理器的利用率和系统的执行速度。

12.1.3 8086 的内部寄存器结构

由图 12.1 可知，8086 微处理器内部具有 14 个 16 位的内部工作寄存器，用于提供指令执行、指令及操作数的寻址。

寄存器结构如图 12.2 所示。14 个寄存器按功能不同可分为 3 组，分别为通用寄存器组、段寄存器组和控制寄存器组。

	寄存器名称	通用名称
数据寄存器组		
高 8 位	低 8 位	
AH	AL	AX（累加器）
BH	BL	BX 基址变址
CH	CL	CX 计数器
DH	DL	DX 数据寄存器
地址指针和变址寄存器组		
BP		基址指针
SP		堆栈指针
SI		源地址
DI		目的变址
控制寄存器组		
IP		指令指针
FLAGS		标志寄存器
段寄存器组		
CS		代码段寄存器
DS		数据段寄存器
ES		附加段寄存器
SS		堆栈段寄存器

图 12.2 8086 的内部寄存器

(1) 通用寄存器组

通用寄存器共 8 个分为两组：数据寄存器（4 个）、地址指针和变址寄存器（4 个）。

数据寄存器包括 4 个寄存器 AX、BX、CX 和 DX，可用来存放 16 位数据或地址，也可将它们当作 8 位存储器(AH、AL、BH、BL、CH、CL、DH、DL)来使用，但只能用来存储数据，而不能用来存储地址。

地址指针和变址寄存器包括 4 个 16 位寄存器 SP、BP、SI、DI，可在运算过程中存储操作数。

(2) 段寄存器组

Intel 8086 有 20 条地址线，寻址空间为 1MB，而 CPU 内部寄存器都只有 16 位，通过寄存器直接寻址只有  $2^{16}=64\text{KB}$ 。为了使 CPU 的寻址能力达到 1MB，把 1MB 存储空间分成多个逻辑段，每个逻辑段最长为 64KB，段寄存器用来存储段地址，CPU 访问存储器的地址码由段地址和段内偏移地址两部分组成。总线端口单元 (BIU) 设有 4 个 16 位的段寄存器，它们分别是代码段寄存器 (CS)、数据段寄存器 (DS)、堆栈段寄存器 (SS) 和附加数据段寄存器 (ES)。

(3) 控制寄存器组

① 指令指针 (Instruction Pointer, IP) 寄存器 (IP)

指令指针寄存器用来存放下一条将要取出的指令在当前代码段中的偏移地址。

② 标志寄存器 (FLAG)

8086 CPU 中有一个 16 位的标志寄存器，实际仅用了 9 位，具体格式如图 12.3 所示。

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
				OF	DF	IF	TF	SF	ZF		AF		PF		CF

图 12.3 8086 标志寄存器格式

6 个状态标志是：

CF 进位标志位。

PF 奇偶标志位：当运算结果的低 8 位中 1 的个数为偶数时，则该位置 1。

AF 半进位标志位：做字节加法时，当低 4 位有向高 4 位的进位，或在做减法时，低 4 位有向高 4 位的借位时，该标志位置 1。

ZF 零标志：运算结果为 0 时，该标志位置 1。

SF 符号标志位：当运算结果的最高位为 1，该标志位置 1。

OF 溢出标志位。

3 个控制标志是：

TF 陷阱标志位：当该位置 1 时，将使 8086/8088 进入单步工作方式，通常用于程序的调试。

IF 中断允许标志位：若该位置 1，则处理器可以响应可屏蔽中断。

DF 方向标志位：若该位置 1，则串操作指令的地址修改为自动减量方向；反之，为自动增量方向。

12.1.4 8086 存储空间管理

1. 存储器数据存储格式

8086 存储器以字节 (8 位) 为单位组织的，20 条地址线，地址范围为 00000H~FFFFFH。

存储器内两个连续的字节定义为一个字。每个字的低字节 (低 8 位) 存放在低地址中，高字节 (高 8 位) 存放在高地址中，字在存储器中的存放格式如图 12.4 所示。

8086 允许字从任何地址开始。字的地址为偶地址时，称字的存储是对准的；若字的地址为奇地址时，称字的存储是未对准的。

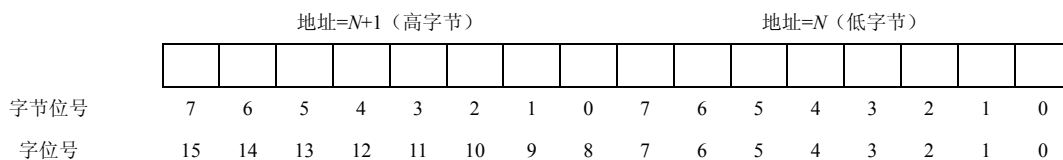


图 12.4 字、字节在存储器中的存放格式

8086 微处理器的数据总线为 16 位，对于访问（读或写）字节的指令，需要一个总线周期，对于访问一个偶数地址的字的指令，也只需一个总线周期，而对于访问一个奇地址的字的指令，则需要两个总线周期（CPU 自动完成）。

## 2. 存储器的分段

前已述及，8086 微处理器具有 20 条地址线，存储器地址空间为 1MB。但是，8086 微处理器是一款 16 位微处理器，内部能提供地址码的地址寄存器（BX，SP，BP，SI，DI 和 IP）都是 16 位的，最多只能寻址 64KB 空间。

为了实现对 1MB 的存储器寻址，8086 系统中引入了存储空间分段概念，即将整个 1MB 的存储空间分成若干个存储段。每个段是存储器中可独立寻址的逻辑单位，称为逻辑段，每个段的最大长度为 64KB，段内地址是连续的，允许各个逻辑段在整个 1MB 存储空间内浮动，但每个逻辑段的起始地址（简称段基址/段首址）必须从能被 16 整除的地址开始，即段的起始地址（20 位地址线）的低 4 位二进制码必须是 0。一个段的起始地址的高 16 位称为该段的段地址。

因此，在 1MB 的存储器地址空间中，可以有  $2^{16}$  个段地址。由于段地址的低 4 位为 0，所以任意相邻的两个段地址相距  $2^4 = 16$  个存储单元。段内一个存储单元的地址，可用相对于段起始地址的偏移量来表示，这个偏移量称为段内偏移地址，也称为有效地址 EA。偏移地址所使用的寄存器也是 16 位的，所以，一个段最大可包含一个 64KB 的存储器空间。各个逻辑段之间可以首尾相连，也可以完全分离或者重叠（部分重叠或完全重叠）。

## 3. 物理地址的形成

由图 12.5 可知，存储器分段以后，任何一个存储单元可被包含在一个逻辑段中，也可以包含在两个或多个重叠的逻辑段中，只要能得到它所在段的段基址和段内偏移地址就可以对它进行访问。而对 1MB 存储器内的任何一个单元进行访问，必须使用 20 位地址码，即物理地址。那么如何从 16 位的段基址和 16 位的段内偏移地址变换为 20 位的实际地址呢？

由上述分段概念可知，在 8086 系统中，每个存储单元在存储器中的位置可以用逻辑地址和物理地址来表示。所谓逻辑地址，是程序设计中使用的地址，由段基址和段内偏移地址两部分组成，段基址和段内偏移地址都是无符号的 16 位二进制数。物理地址也叫实际地址或绝对地址，是 CPU 访问存储器时实际使用的地址，地址总线上传送的就是这个实际地址。

当 CPU 访问存储器时，必须完成逻辑地址到物理地址转换，才能访问到对应的实际存储空间。

两者的变换关系如图 12.6 所示。将 16 位段基址左移 4 位（相当于在段基址的低 4 位补 4 个“0”），然后与 16 位段内偏移地址相加而获得 20 位物理地址，逻辑地址到物理地址转换公式

$$\text{物理地址} = \text{段基址} \times 16 + \text{段内偏移地址}$$

## 4. 信息分段存储与段寄存器的关系

段寄存器的使用不仅使 CPU 的地址访问能力扩大到 1MB，同时也为信息按特征分段存储带来了方便。存储器中的信息可分为程序、数据和微处理器的状态信息。为了操作方便，存储

器可相应地划分为：程序区，该区存储程序的指令代码；数据区，用以存储原始数据、中间结果和最终结果；堆栈区，用以存储需要压入堆栈的数据或状态信息。

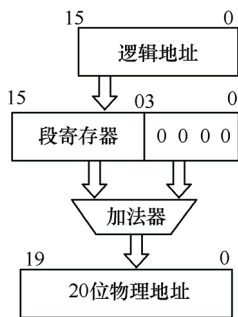


图 12.5 物理地址的形成过程

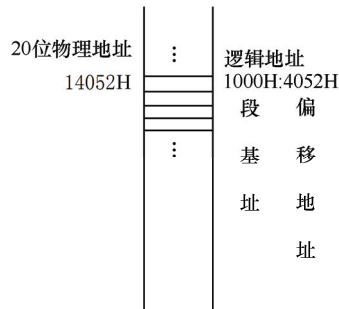


图 12.6 逻辑地址与物理地址

段寄存器的分工是：代码段寄存器 CS 划定并控制着程序区；数据段寄存器 DS 和附加段寄存器 ES 控制着数据区；而堆栈段寄存器 SS 对应堆栈存储区。表 12.1 列出了各种类型访问存储器时所要使用的段寄存器和段内偏移地址的来源，它规定了为各种目的访问存储器时所形成的 20 位物理地址的原则。

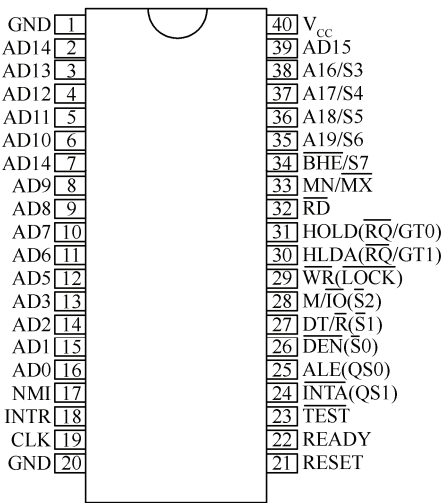
表 12.1 各种类型存储器访问所使用的段寄存器和段内偏移地址

存储器操作的类型	隐含的段寄存器	允许超越的段寄存器	段内偏移地址来源
取指令	CS	无	IP
堆栈操作	SS	无	SP
通用数据读取	DS	CS, ES, SS	由寻址方式求得有效地址
源数据串	DS	CS, ES, SS	SI
目的数据串	ES	无	DI
用 BP 作为基址寄存器	SS	CS, DS, ES	由寻址方式求得有效地址

需要指出的是，基于 8086 微处理器的 IBM PC 是一个通用微机系统，在存储空间的安排上，有一部分空间被系统占用，用户不能使用。例如，在主存储器的地址低端和高端有一部分存储单元的用处是固定的，如用作中断向量表、显示缓冲区和系统启动地址等，用户是不能占用的。

12.1.5 8086 的引脚功能

8086 微处理器采用 40 条引脚的双列直插式封装。为减少引脚，采用分时复用的地址/数据总线，因此地址总线 and 数据总线公用相同的引脚。8086 微处理器具有两种工作方式：最小工作方式和最大工作方式。在不同工作方式下，部分引脚的功能不同。图 12.7 所示为 8086 引脚图。



注：括号中的为最大方式时的引脚

图 12.7 8086 引脚图

8086 微处理器的引脚构成了微处理器级

总线,引脚功能也就是微处理器级总线的功能。在 8086 微处理器的 40 条引脚具体定义见表 12.2。

表 12.2 8086 引脚信号定义

公共信号			
名称	功能	引脚号	类型
AD15~AD0	地址/数据总线	2~16,39	双向、三态
A19/S6~A16/S3	地址/状态总线	35~38	输出、三态
$\overline{\text{BHE}}/\text{S7}$	总线高允许/状态	34	输出、三态
$\text{MN}/\overline{\text{MX}}$	最小/最大方式控制	33	输入
$\overline{\text{RD}}$	读控制	32	输出、三态
$\overline{\text{TEST}}$	等待测试控制	23	输入
READY	等待状态控制	22	输入
RESET	系统复位	21	输入
NMI	不可屏蔽状态请求	17	输入
INTR	可屏蔽状态请求	18	输入
CLK	系统时钟	19	输入
$V_{\text{CC}}$	电源	40	输入
GND	地	1,20	输入
最小方式信号 ( $\text{MN}/\overline{\text{MX}} = V_{\text{CC}}$ )			
HOLD	保持请求	31	输入
HLDA	保持响应	30	输出
$\overline{\text{WR}}$	写控制	29	输出、三态
$\text{M}/\overline{\text{IO}}$	存储器/IO 控制	28	输出、三态
$\text{DT}/\overline{\text{R}}$	数据发送/接收	27	输出、三态
$\overline{\text{DEN}}$	数据允许	26	输出、三态
ALE	地址锁存允许	25	输出
$\overline{\text{INTA}}$	中断响应	24	输出
最大方式信号 ( $\text{MN}/\overline{\text{MX}} = \text{GND}$ )			
$\overline{\text{RQ}}/\text{GT1}, \overline{\text{RQ}}/\text{GT0}$	请求/允许总线访问控制	30,31	双向
$\overline{\text{LOCK}}$	总线优先权锁定控制	29	输出、三态
$\overline{\text{S2}}, \overline{\text{S1}}, \overline{\text{S0}}$	总线周期状态	26~28	输出、三态
QS1、QS0	指令队列状态	24~25	输出

### 12.1.6 8086 的两种工作模式

在不同的使用场合,8086 CPU 所连接的存储器和外设规模的都不尽相同,为了适应各种各样的使用场合,8086 CPU 芯片在设计了两种工作模式,即最小工作方式和最大工作方式。

#### 1. 最小工作方式

所谓最小工作方式,就是系统中只有一个 8086 微处理器。在这种情况下,所有的总线控制信号都是直接由 8086 CPU 产生的,系统中的总线控制逻辑电路被减到最少。将 8086/8088 CPU

的引脚  $\overline{MN}/\overline{MX}$  接高电平, 就使 CPU 工作于最小工作方式。最小工作方式适用于由单微处理器组成的小系统。在这种系统中, 8086 CPU 直接产生所有的总线控制信号, 因而省去了总线控制逻辑。图 12.8 为最小系统的系统配置图。

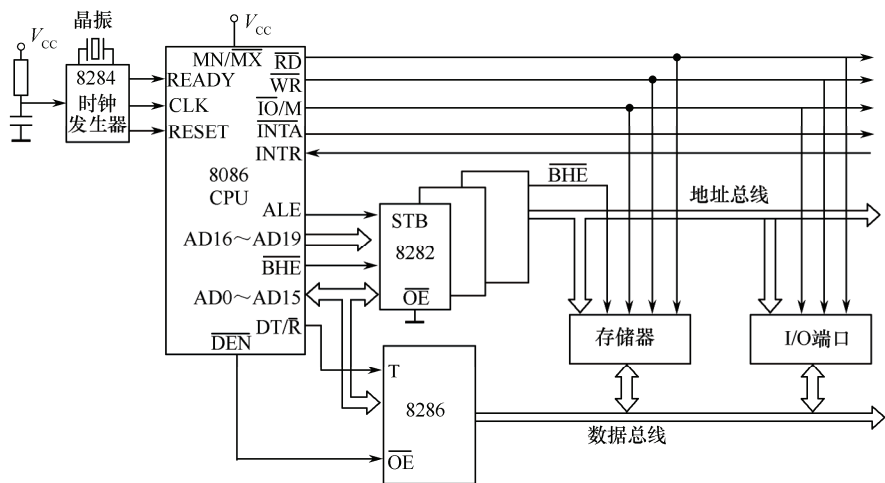


图 12.8 最小系统的系统配置图

## 2. 最大工作方式

最大工作方式是相对于最小工作方式而言的, 将 8086/8088 CPU 的引脚  $\overline{MN}/\overline{MX}$  接地, 就使 CPU 工作于最大模式。最大系统用在中、大规模的微机应用系统中。在最大系统下, 系统中至少包含两个微处理器, 其中一个为主处理器, 即 8086 CPU, 其他的微处理器称为协处理器, 是协助主处理器工作的。

图 12.9 是 8086 最大方式下的基本系统配置, 与图 12.8 的最小方式系统配置相比, 增加了一个总线控制器 8288。总线控制器 8288 用来产生具有适当定时的总线命令信号和总线控制信号。也就是说, 在最大方式下, CPU 不直接产生系统所需的总线控制信号, 所有的总线控制信号均由总线控制器 8288 产生。

### 12.1.7 8086 的总线周期

在微机系统中, CPU 的操作都是在系统主时钟 CLK 的控制下按节拍有序进行的。按照一般的概念, CPU 执行一条指令的时间 (包括取指令和执行完该指令所需的全部时间) 称为一个指令周期。在指令周期内, 通常需要对总线上的存储器或 I/O 端口进行一次或多次读/写 (访问) 操作, 这里把通过外部总线对存储器或 I/O 端口进行一次读/写操作的过程称为总线周期。因此, 一个指令周期由若干个总线周期组成。而一个总线周期由若干时钟周期  $T$  组成。时钟周期也就是系统主时钟频率的倒数, 是 CPU 的基本时间计量单位。

在 8086 CPU 中, 所有的外部操作 (读/写存储器或 I/O 端口) 都是由总线端口部件 BIU 通过系统总线完成的。因此, 把 BIU 完成一次对存储器或 I/O 端口的读/写操作所需要的时间称为一个总线周期。8086 CPU 的一个基本总线周期由 4 个时钟周期 ( $T_1, T_2, T_3, T_4$ ) 组成, 时钟周期也称为时钟状态, 即  $T_1$  状态、 $T_2$  状态、 $T_3$  状态和  $T_4$  状态。每个时钟周期 (时钟状态) 内完成一些基本操作。

8086 微处理器的操作是由指令译码器输出的电位和外部输入的时钟信号联合作用并在由此而产生的各个命令控制下进行的, 可分为内操作与外操作两种, 内操作控制算术逻辑运算单元 ALU 进行算术逻辑运算, 控制寄存器组进行寄存器选择以及判断是送往数据线还是地址线、

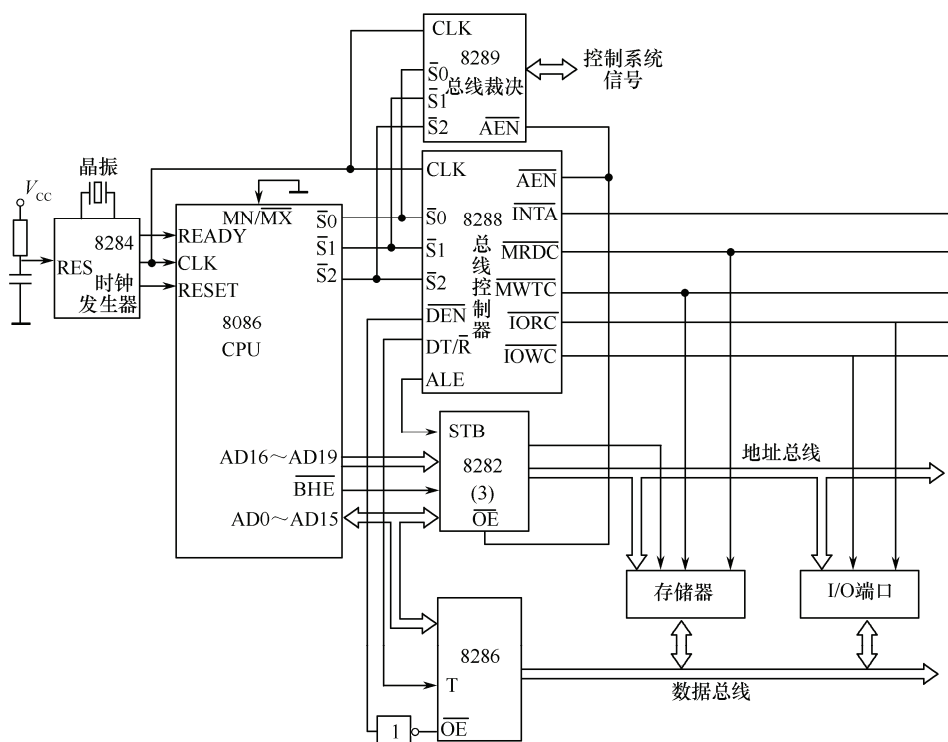


图 12.9 最大方式下的基本系统配置图

进行读操作还是写操作等，所有这些操作都在 CPU 内部进行，用户可以不关心。CPU 的外部操作是系统对 CPU 的控制或是 CPU 对系统的控制，用户必须了解这些控制信号以便正确使用。

图 12.10 给出了 8086 CPU 典型总线周期序列。

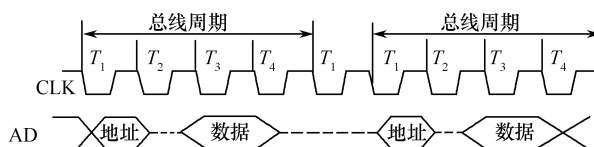


图 12.10 8086 CPU 典型总线周期序列

## 12.1.8 8086 的指令系统

### 1. 寻址方式

寻址方式有立即寻址、寄存器寻址、存储器和 I/O 端口寻址。其中，存储器寻址又包括直接寻址、寄存器间接寻址、变址寻址和基址加变址寻址。

### 2. 8086 指令系统

Intel 8086 CPU 的 16 位基本指令集与近年来广泛应用的 32 位 80X86，包括 Pentium 系列完全兼容，因此，8086 指令系统是整个 Intel 80X86 系列指令系统的基础。

8086 的指令按功能可以分为 6 类：数据传送指令、算术运算指令、逻辑运算和移位指令、串操作指令、控制转移指令和处理器控制指令，见表 12.3 至表 12.5。



表 12.3 数据传送指令表

助记符类别	指令格式	操 作
MOV	MOV dst, src	从 src 确定的位置取出源操作数, 或把立即数形式的 src 作为源操作数, 送到目的操作数 dst 确定的位置
PUSH	PUSH src	把字操作数 src 入栈
POP	POP dst	出栈一个字数据, 送到操作数 dst 确定的位置
XCHG	XCHG opr1, opr2	把 opr1、opr2 两个操作数中的内容互换
XLAT	XLAT	以 BX+AL 的和作为偏移地址, 从数据段相应位置取出一个字节数据送 AL 寄存器
LEA	LEA dst, src	取操作数 src 在内存的偏移地址, 送到 dst 确定的位置
PUSHF	PUSH	F 把标志寄存器 FLAGS 入栈
POPF	POPF	出栈一个字数据, 送到标志寄存器 FLAGS 中
IN	IN AL, src IN AX, src	从 src 指定的外设端口取出一个字节数据送到 AL; 或从 src 指定的外设端口及其下一端口取一个字数据送到 AX 中
OUT	OUT dst, AL OUT dst, AX	把 AL 的值送到 dst 指定的外设端口; 或把 AX 的值送到 dst 指定的外设端口及其下一端口

表 12.4 算术运算指令

ADD	ADD dst, src	把两个操作数的值相加, 结果送到 dst 操作数确定的位置
ADC	ADC dst, src	把两个操作数及 CF 标志位的值三者相加, 结果送到 dst 操作数确定的位置
INC	INC opr	把 opr 的值加 1 后送回 opr 中
SUB	SUB dst, src	把 dst 减去 src 的差送回操作数 dst 中
SBB	SBB dst, src	把 dst 减去 src 的差再减去 CF 的值, 结果送回操作数 dst 中
DEC	DEC opr	把操作数 opr 的值减 1 送回 opr 中
NEG	NEG opr	对操作数 opr 的值取反加 1 后送回 opr 中
CMP	CMP dst, src	用 dst 减去 src, 根据相减情况设置各条件标志位
MUL	MUL src	无符号乘法: AL 乘以字节操作数 src, 乘积送到 AX 中; 或 AX 乘以字操作数 src, 乘积送到 (DX, AX) 中
IMUL	IMUL src	带符号乘法: AL 乘以字节型操作数 src, 乘积送到 AX 中; 或 AX 乘以字操作数 src, 乘积送到 (DX, AX) 中
DIV	DIV src	无符号除法: AX 除以 src, 商送 AL, 余数送 AH; 或 (DX, AX) 除以 src, 商送 AX, 余数送 DX
IDIV	IDIV src	带符号除法: AX 除以 src, 商送 AL, 余数送 AH; 或 (DX, AX) 除以 src, 商送 AX, 余数送 DX
DAA	DAA	把 AL 中的和调整到压缩的 BCD 格式
DAS	DAS	把 AL 中的差调整到压缩的 BCD 格式
AAA	AAA	把 AL 中的和调整到非压缩的 BCD 格式, AH 加调整产生的进位值
AAS	AAS	把 AL 中的差调整到非压缩的 BCD 格式, AH 减调整产生的借位值
AAM	AAM	把 AH 中的积调整到非压缩的 BCD 格式
AAD	AAD	实现除法的非压缩 BCD 码调整

表 12.5 逻辑运算指令

AND	AND dst,src	两个操作数按各个二进制位进行逻辑与运算，结果送回 dst 中
OR	OR dst,src	两个操作数按各个二进制位进行逻辑或运算，结果送回 dst 中
NOT	NOT opr	对 opr 的各个二进制位取反，结果送回 opr
XOR	XOR dst,src	两个操作数按各个二进制位进行逻辑异或运算，结果送回 dst 中
TEST	TEST dst,src	两个操作数按各个二进制位进行逻辑与运算，用计算结果设置标志位

## 12.1.9 汇编语言程序设计

### 1. 汇编语言源程序的结构

鉴于 8086 系列微处理器都采用存储器分段管理，其汇编语言都是以逻辑段为基础，按段的概念来组织代码和数据的，因此作为用汇编语言编写的源程序，其结构上具有以下特点：

- ① 由若干逻辑段组成，各逻辑段由伪指令语句定义和说明；
- ② 整个源程序以 END 伪指令结束；
- ③ 每个逻辑段由语句序列组成，以 SEGMENT 语句开始，以 ENDS 语句结束。

下面先看一个完整的用汇编语言编写程序的格式。

**【例 12.1】**在屏幕上显示并打印字符串 “This is a sample program.”

```

DATA          SEGMENT                                ;数据段
                DA1          DB 'This is a sample program. '
                                DB 0DH,0AH,'$'          ;回车，换行
DATA          ENDS                                    ;数据段结束
STACK         SEGMENT                                ;堆栈段
                ST1          DB 100DUB(?)              ;一百个内容不定字节空间
STACK         ENDS                                    ;堆栈段结束
CODE          SEGMENT                                ;代码段
MAIN          PROC          FAR                        ;主过程，属性为远调用
                ASSUME       CS:CODE,DS:DATA,SS:STACK ;段分配
                ORG          1000
START:        PUSH         DS                          ;正常返回所需段地址及偏移地址
                MOV          AX,0
                PUSH         AX
                MOV          AX,DATA                    ;送数据段地址给 DS
                MOV          DS,AX
                MOV          AX,STACK                  ;送堆栈段地址给 SS
                MOV          SS,AX
                MOV          AH,9                      ;DOS 9 号功能调用,显示字符串
                MOV          DX,OFFSET DA1              ;把字符串首地址送给 DX
                INT          21H                      ;9 号调用，显示字符串
                RET
MAIN          ENDP                                    ;主过程结束
CODE          ENDS                                    ;代码段结束
END           START                                    ;程序结束

```

从例子中看到整个程序是分段的，先要设置数据段、堆栈段、代码段，每段均由伪指令 SEGMENT 开始，ENDS 结束。整个源程序用 END 结尾，END 后面可跟该程序执行的起始地址 START。

因此，汇编语言源程序的基本结构是段，一个汇编语言源程序由若干个代码段、数据段、附加段和堆栈段组成。段之间的顺序可以随意安排，通常数据段在前，代码段在后。每个段都

有段首指令和段结束指令，段的内容介于这两条指令之间。

其一般结构如下：

```
SSEG      SEGMENT      STACK
<堆栈段的内容>
SSEG      ENDS
DSEG      SEGMENT      DATA
<数据段的内容>
DSEG      ENDS
CSEG      SEGMENT      CODE
<代码段的内容>
CSEG      ENDS
          END <启动标号>
```

通常，数据段用来在内存中建立一个适当容量的工作区，以存放常数、变量等操作数据。堆栈段用来在内存中建立一个适当的堆栈区，以便在中断、子程序调用时使用。代码段包括许多以符号表示的指令，其内容就是程序要执行的指令。其中，必不可少的是代码段和堆栈段，堆栈段也可以不用显示定义，可以直接使用隐式堆栈段，如果程序中需要使用数据存储空间，则要定义数据段，必要时还要定义附加段。对于一般程序来说，定义太多的段只会增加程序设计的复杂性，通常需要一个代码段、一个数据段和一个堆栈段，有时可包含一个附加段。而对于复杂的程序，除了使用上述 3 个段以外还可以使用多个段，甚至可以使用多个程序模块。

## 2. 伪操作指令

在 IBM 宏汇编中有以下几种伪指令语句（Directive Statements）：①数据定义伪指令；②符号定义伪指令；③段定义伪指令；④过程定义伪指令；⑤宏处理伪指令；⑥其他伪指令。

## 3. BIOS 和 DOS 的功能

BIOS（Basic I/O System）是 PC 厂商固化在只读存储器 ROM 中的外部设备驱动和管理软件，它处于系统软件的最底层，主要提供系统自检及初始化、系统服务（IO 操作）和硬件中断处理功能。DOS 是磁盘操作系统，它提供了一些功能调用模块，可完成对文件、设备、内存的管理。

编写汇编语言程序调用 BIOS 和 DOS 相应子程序，可以完成输入/输出（I/O）设备管理、存储管理、文件管理和作业管理。

### （1）DOS 软件中断和系统功能调用

磁盘操作系统（Disk Operating System）是 PC 上最重要的操作系统，它存放在软盘或硬盘上。IBMBIO.COM 是 DOS 与 BIOS 的接口；IBMDOS.COM 是文件管理处理程序。因为 DOS 模块提供了更多更必要的测试，所以使 DOS 操作比使用相应功能的 BIOS 操作更简易，而且 DOS 对硬件的依赖性更少些。一般来说，MS-DOS 中常用的软中断指令有 8 条，系统规定它们的中断类型码为 20H~27H，它们各自的功能及入口/出口参数见表 12.6。

在所有的这些 DOS 软件中断中，功能最强大的是 INT 21H，它提供了一系列的 DOS 功能调用。DOS 版本越高，所给出的 DOS 功能调用越多，DOS 6.2 包含 100 多个功能调用，可以说 INT 21H 的中断调用几乎包括了整个系统的功能，用户不需要了解 I/O 设备的特性及接口要求就可以利用它们编程，对用户来说非常有用。

表 12.6 DOS 常用的软中断命令

软中断指令	功能	入口参数	出口参数
INT 20H	程序正常退出	无	无
INT 21H	DOS 功能调用	AH=功能号, 相应入口号	相应出入口号
INT 22H	结束退出		
INT 23H	Ctrl-Break 处理		
INT 24H	出错处理		
INT 25H	读磁盘	AL=驱动器号 CX=读入扇区号 DX=起始逻辑扇区号 DS:BX=内存缓冲区地址	CF=0 成功 CF=1 失败
INT 26H	写磁盘	AL=驱动器号 CX=写读入扇区号 DX=起始逻辑扇区号 DS:BX=内存缓冲区地址	CF=0 成功 CF=1 失败
INT 27H	驻留退出	DS:D=程序长度	

### (2) BIOS 中断调用

在存储器系统中, 内存器高端 8KB 的 ROM 中存放有基本输入/输出系统 BIOS 例行程序。BIOS 提供了最低最直接的硬件控制, 是硬件与软件之间的接口。BIOS 主要包括以下一些功能。

① 系统自检及初始化。例如, 系统加电启动时对硬件进行检测; 对外部设备进行初始化; 设置中断向量; 引导操作系统等。

② 系统服务。为操作系统和应用程序提供系统服务, 这些服务主要与 I/O 设备有关, 如读取键盘输入等。为了完成这些操作, BIOS 必须直接与 I/O 设备打交道, 并通过接口与 I/O 设备之间传送数据, 使应用程序脱离具体的硬件操作。

③ 硬件中断处理, 提供硬件中断服务程序。

使用 BIOS 功能调用, 给程序员编程带来了极大方便。程序员不必了解硬件的具体细节, 通过中断来调用 BIOS 中例程, 完成各种功能操作, 所以利用 BIOS 功能调用编写的程序简洁, 可读性好, 而且易于移植。与 DOS 功能调用相同, 用户可以直接用指令设置参数, 然后中断调用 BIOS 中的程序, 给用户编程带来极大的方便。

表 12.7 列出了 IBM PC 主要的 BIOS 中断类型。

表 12.7 IBM PC 主要的 BIOS 中断类型

CPU 中断类型	0, 除法错; 1, 单步; 2, 非屏幕; 3, 断点; 4, 溢出; 5, 打印屏幕; 6, 保留; 7, 保留
8259 中断类型	8, 8254 系统定时器; 9, 键盘; 0AH, 保留; 0BH, 保留; 0CH, 保留; 0DH, 保留 Alt 打印机); 0EH, 软盘; 0FH, 打印机
BIOS 中断类型	10H, 显示器; 11H, 设备检验; 12H, 内存大小; 13H, 磁盘; 14H, 通信; 15H, I/O 系统扩充; 16H, 键盘; 17H, 打印机; 18H, 驻留 BASIC; 19H, 引导; 1AH, 时钟; 40H, 软盘
用户应用程序	1BH, 键盘 Break; 1CH, 定时器; 4AH, 报警
数据表指针	1DH, 显示器参量; 1EH, 软盘参量; 1FH, 图形字符扩充; 41H, 1#硬盘参量; 46H, 2#硬盘参量

## 12.2 微处理器系统构成与扩展

### 12.2.1 微型计算机系统的构成

#### 1. 硬件系统

##### (1) 微型计算机

微型计算机结构框图如图 12.11 所示。由图可知：一台微型计算机主要由微处理器 CPU、存储器、输入/输出接口电路及系统总线（虚线上的部分）、外围设备和电源构成。

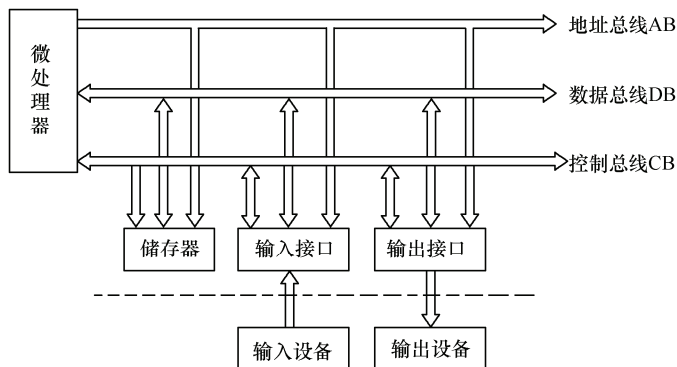


图 12.11 微型计算机结构框图

##### (2) 外部设备

外部设备主要有：显示器、键盘、鼠标、打印机、调制解调器、网卡和扫描仪等。过程控制输入/输出通道主要有模数转换器、数模转换器、开关量及信号指示输入/输出器等。这些设备是组成一个微机基本系统必不可少的。

##### (3) 电源

电源是保证微机系统能正常运行的工作电源。PC 的电源将 220V 交流电转换成 $\pm 5V$  和 $\pm 12V$  四种 DC（直流）电压。

把运算器、控制器、主存储器和输入/输出接口称为组成计算机硬件系统的五大部件。计算机硬件的五大部件是通过总线连接起来的，构成了计算机的基本硬件系统。

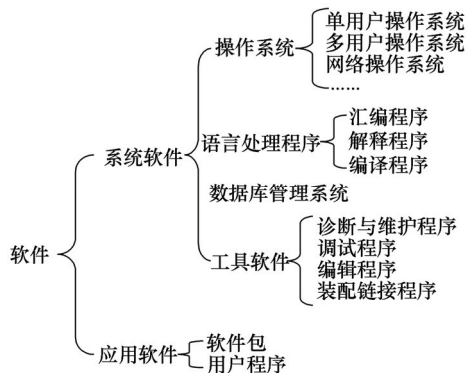


图 12.12 软件系统的层次

#### 2. 软件系统

计算机软件是计算机系统的重要组成部分，它可以分成系统软件和应用软件两大类。图 12.12 表示了计算机软件的层次。

系统软件是指控制和协调计算机及其外部设备，支持应用软件的开发和运行的软件。其主要的功能是进行调度、监控和维护系统等。系统软件是用户和裸机的接口。应用软件是用户为解决各种实际问题而编制的计算机应用程序及其有关资料。

## 12.2.2 8086 系统扩展

### 1. 存储器的扩展

存储器的扩展主要解决两个问题：一个是如何用容量较小、字长较短的芯片，组成微机系统所需的存储器；另一个是存储器如何与 CPU 的连接。

#### (1) 存储芯片的扩展

存储芯片的扩展包括位扩展、字扩展和字位同时扩展 3 种情况。

#### (2) 存储器与 CPU 的连接

扩展的存储器与 CPU 的连接实际上就是与三总线中相关信号的连接。

##### ① 存储器与控制总线的连接

在控制总线中，与存储器相连的信号为数不多，如 8086/8088 最小方式下的  $\overline{M/\overline{IO}}$ （8088 为  $\overline{IO/\overline{M}}$ ）、 $\overline{RD}$  和  $\overline{WR}$ ，最大方式下的  $\overline{MRDC}$ 、 $\overline{MWTC}$ 、 $\overline{IORC}$  和  $\overline{IOWC}$  等，连接非常方便，有时这些控制线（如  $\overline{M/\overline{IO}}$ ）也与地址线一同参与地址译码，生成片选信号。

##### ② 存储器与数据总线的连接

对于不同型号的 CPU，数据总线的数目不一定相同，连接时要特别注意。

8086CPU 的数据总线有 16 根，其中高 8 位数据线 D15~D8 接存储器的高位库（奇地址库），低 8 位数据线 D7~D0 接存储器的低位库（偶地址库），根据 BHE（选择奇地址库）和 A0（选择偶地址库）的不同状态组合决定对存储器做字操作还是字节操作。

8 位机和 8088CPU 的数据总线有 8 根，存储器为单一存储体组织，没有高低位库之分，故数据线的连接较简单。

##### ③ 存储器与地址总线的连接

对于字扩展和字位同时扩展的存储器与地址总线的连接分为低位地址线的连接和高位地址线的连接。低位地址线的连接较简单，直接和存储芯片的地址信号连接作为片内地址译码，而高位地址线的连接主要用来产生片选信号（称为片间地址译码），以决定每个存储芯片在整个存储单元中的地址范围，避免各芯片地址空间的重叠。

### 2. 输入/输出接口的扩展

输入/输出（I/O）接口是计算机系统的一个重要组成部分，能够实现计算机与外界之间的信息交换。而 I/O 接口技术就是实现 CPU 与外部设备（简称外设）进行数据交换的一门技术，在微机系统设计和应用中都占有重要的地位。

#### (1) I/O 端口的编址方式

I/O 端口地址通常有两种编址方式：一种是将内存地址与 I/O 端口地址统一编在同一地址空间中，称为存储器映像的 I/O 编址方式；另一种是将内存地址与 I/O 端口地址分别编在不同的地址空间中，称为 I/O 端口单独编址方式。Intel 的 8086 系列处理器使用这种编址方式。

8086/8088 系统内存地址的范围是 00000H~FFFFFH，而外设端口的地址范围是 0000H~FFFFH，这两个地址相互独立、互不影响。

由于 I/O 端口编址的独立性，微处理器需要提供两类访问指令：一类用于存储器访问，它具有多种寻址方式；另一类用于 I/O 端口的访问，称为 I/O 指令。Intel 公司的 80X86 系列微机采用单独编址方式。

在 8086/8088 系统中，使用专门的输入指令 IN 和输出指令 OUT 实现对端口的访问。在使用这两条指令时要注意两个问题，一是 I/O 指令中端口寻址问题，另一个是 I/O 指令中数据宽度问题。

对 I/O 指令中端口的寻址有两种,即直接寻址和间接寻址。当 I/O 端口地址的范围在 00H~FFH 内时, I/O 指令中的端口可采用直接寻址, 如要访问系统板上的 8259 I/O 芯片:

```
MOV AL,20H          ;中断结束命令给 AL
OUT 20H,AL          ;AL 内容给 8259 的 20H 端口
```

当 I/O 端口地址的范围在 0000H~FFFFH 内时, I/O 指令中的端口可采用间接寻址, 如要访问扩展槽或自行设计的扩展系统时, 可采用间接寻址:

```
MOV DX,303H         ;8255 命令口地址给 DX
MOV AL,89H          ;8255 的命令字给 AL
OUT DX,AL           ;AL 中的命令字给 8255 的命令口
```

I/O 指令中的数据宽度是由指令中使用的累加器确定的, 与 I/O 端口的寻址方式无关。如果要传送字节数据, 用 AL 累加器; 传送字数据, 用 AX 累加器。

同时, CPU 在寻址内存和外设时, 使用不同的控制信号来区分当前是对内存操作还是对 I/O 端口进行操作。

例如, 8086 的  $M/\overline{IO}$  控制线, 当  $M/\overline{IO}=0$  时, 访问 I/O 端口; 当  $M/\overline{IO}=1$  时, 访问内存单元。

表 12.8 PC XT/AT I/O 端口地址分配

DMAC1	0000~001FH
DMAC2	00C0~00DFH
DMA 页面寄存器	0080~009FH
中断控制器 1	0020~003FH
中断控制器 2	00A0~00BFH
定时器	0040~005FH
并行接口芯片 (键盘接口)	0060~006FH
RT/CMOS RAM	0070~007FH
协处理器	00F0~00FFH
游戏控制卡	0200~020FH
并行口控制卡 1	0370~037FH
并行口控制卡 2	0270~027FH
串行口控制卡 1	03F8~03FFH
串行口控制卡 2	02F8~02FFH
原型插件板 (用户可用)	0300~031FH
同步通信卡 1	03A0~03AF
同步通信卡 2	0380~038FH
单显 MDA	03B0~03BFH
彩色显示器 CGA	03D0~03DFH
彩色显示器 EGA/VGA	03C0~03CFH
软驱控制卡	03F0~03FFH
硬驱控制卡	01F0~01FFH
PC 网卡	0360~036FH

I/O 端口单独编址方式的优点是不占用存储器地址, 因而不会减少存储器容量; 地址线较少, 且寻址速度相对较快; 具有专门的 I/O 指令, 使编制的程序清晰, 便于理解和检查。

(2) PC XT/AT I/O 端口地址分配

微机系统 I/O 端口地址范围为 0000H~0FFFFH 的连续地址空间, 所以在寻址外设时, 需要 16 根地址线 A15~A0。但 IBM 公司在设计 PC 微机主板和规划接口卡时, 其端口地址的译码采用的是非完全地址译码方式, 仅使用了地址总线的低 10 位地址线, 故有 1024 个 I/O 端口地址, 地址范围为 0000H~03FFH。目前, 高档微机中使用的全都是 16 根地址线, 共可寻址 65536 个 8 位 I/O 端口地址。

I/O 端口地址是微机系统的重要资源, 只有弄清了系统的 I/O 地址分配, 了解哪些地址是被系统占用、哪些地址是被保留、哪些地址是空闲的情况后, 才能在增加新的设备时, 作出合理的地址选择。在 PC XT/AT 中, 8086 CPU 对 I/O 端口采用单独编址方式, 其中, 低 256 个端口 (000H~0FFH) 供系统板上的 I/O 接口芯片使用, 高 768 个端口地址 (100H~3FFH) 供扩展槽上的 I/O 接口卡使用。其 I/O 地址空间分配见表 12.8。

(3) I/O 端口地址的译码

① 8088/8086 微处理器能够寻址的内存空间为 1MB, 所以要用到 20 根地址总线, 其中高位

(A19~Ai) 用于确定芯片的地址范围，而低位 (Ai-1~A0) 用于片内寻址；而 8088/8086 CPU 能够寻址的 I/O 端口仅为 64KB (65535) 个，所以只需用地址总线的低 16 位信号线，实际在 PCXT/AT 中只用到了低 10 位地址线 (A9~A0)。

② 当 CPU 工作在最大模式时，对存储器的读/写要求控制信号 MEMR 或 MEMW 有效；如果是对 I/O 端口读/写，则要求控制信号 IOR 或 IOW 有效。

③ 地址总线上呈现的信号是内存的地址还是 I/O 端口的地址，取决于 8086 微处理器的 M/ $\overline{\text{IO}}$  引脚的状态。当 M/ $\overline{\text{IO}}$ =1 时，为内存地址，即 CPU 正在对内存进行读/写操作；M/ $\overline{\text{IO}}$ =0 时，为 I/O 端口地址，即 CPU 正在对 I/O 端口进行读/写操作。

图 12.13 给出了 IBM PC/XT I/O 端口地址译码的电路，它是利用 74LS138 译码器对端口进行译码的。图中的高 5 位地址 A9~A5 参与译码，分别产生 DMA8237 片选、中断控制器 8259 片选、定时/计数器 8253 片选、并行接口 8255A 片选信号等；低 5 位地址用作各芯片内部寄存器的访问地址。图中的  $\overline{\text{AEN}}$  信号是由 DMA 控制器发出的系统总线控制信号， $\overline{\text{AEN}}$ =0 表示 CPU 占用地址总线，译码有效，可以访问端口地址；当 ALE=1 时，表示 DMA 占用地址总线，译码无效，防止了在 DMA 周期内无访端口地址。

由译码器的功能很容易推出，8237 的端口地址范围是 000H~01FH，8259 的端口地址范围是 020H~03FH，74LS138 译码器输出的对应端口地址见表 12.9。

表 12.9 IBM PC/XT I/O 端口地址译码映像表

地址线										译码输出线	对应地址范围	接口芯片
A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0			
0	0	0	0	0	×	×	×	×	×	$\overline{\text{Y}}_0$	000H~01FH	DMAC8237
0	0	0	0	1	×	×	×	×	×	$\overline{\text{Y}}_1$	020H~03FH	中断控制器 8259
0	0	0	1	0	×	×	×	×	×	$\overline{\text{Y}}_2$	040H~05FH	定时计数器 8253
0	0	0	1	1	×	×	×	×	×	$\overline{\text{Y}}_3$	060H~07FH	并行接口 8255A
0	0	1	0	0	×	×	×	×	×	$\overline{\text{Y}}_4$	080H~09FH	写 DMA 页面寄存器
0	0	1	0	1	×	×	×	×	×	$\overline{\text{Y}}_5$	0A0H~0BFH	写 NMI 页面寄存器
0	0	1	1	0	×	×	×	×	×	$\overline{\text{Y}}_6$	0C0H~0DFH	

### 3. 中断系统的扩展

8086/8088 系统可处理 256 种不同类型的中断，每个中断对应一个中断类型号，所以 256 种中断对应的中断类型号为 0~255，这 256 种不同类型的中断可以来自外部，即由硬件产生，也可以来自内部，即由软件（中断指令）产生，或者满足某些特定条件后引发 CPU 中断。

#### (1) 外部中断

外部中断是由 CPU 的外部中断请求引脚 NMI 和 INTR 引起的中断过程，可分为非屏蔽中断和可屏蔽中断两种。

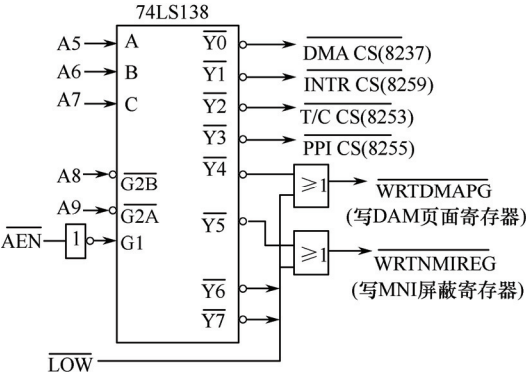


图 12.13 给出了 IBM PC/XT I/O 端口地址译码的电路



当 NMI 请求被响应时，不要求外部向 CPU 提供中断类型号，CPU 在总线上也不发送 INTA 中断应答信号，而是 CPU 自动转入相应的中断服务程序。

在 IBM PC/XT 中的非屏蔽中断源有 3 种：浮点运算协处理器 8087 的中断请求、系统板上 RAM 的奇偶校验错和扩展槽中的 I/O 通道错。

在 IBM PC/XT 中，所有 8 个可屏蔽中断的中断源都先经过中断控制器 8259A 管理之后再向 CPU 发出 INTR 请求。而在 IBM PC/AT 中，使用两片 8259A，用来管理 15 级外部中断。

IBM PC/XT 系统和系统的外部中断见表 12.10。

(2) 内部中断

8086/8088 有相当丰富的内部中断功能。它们可以是由 CPU 内部硬件产生的，也可由软件的中断指令 INT n 引起的，其中 n 称为中断类型号。一部分已定义的中断类型号用于 CPU 的特殊功能处理。

表 12.10 IBM PC/XT 系统和系统的外部中断

PC/XT	IRQ	标准应用	IRQ	标准应用
	NMI	RAM、I/O 校验错、8087 运算错		
	0	定时/计算器 0 通道的日时钟	4	异步通信 1 (COM1)
	1	键盘	5	硬盘盘控制器
	2	保留 (网络适配器)	6	软磁盘控制器
	3	异步通信 2 (COM2)	7	并行打印机 (LPT1)
PC/AT	IRQ	标准应用	IRQ	标准应用
	NMI	RAM、I/O 校验错、8087 运算错		
	0	系统时钟 (18.2Hz)	8	日历实时钟
	1	键盘中断	9	改向 INT 0AH (以 IRQ2 出现)
	2	接收从片 8259A 的中断请求 INT	10	保留
	3	异步通信 2 (COM2)	11	保留
	4	异步通信 1 (COM1)	12	PS/2 鼠标器
	5	并行口 2 (LPT2)	13	协处理器
	6	软磁盘控制器	14	硬盘盘控制器
	7	并行口 1 (LPT1)	15	保留

(3) 中断向量表

8086/8088 CPU 是采用向量中断的方式来处理对可屏蔽中断的响应。向量中断是指连接外部中断源的接口电路向 CPU 提供中断类型号，CPU 根据类型号确定中断服务程序入口地址信息的中断方式，也称为矢量中断。

(4) 中断向量

在 8086/8088 CPU 中，通常称中断服务程序入口地址为中断向量，每个中断类型对应一个中断向量。每个中断向量为 4B (32 位)，用逻辑地址表示一个中断服务程序的入口地址，占用 4 个连续的存储单元，其中低 16 位 (前 2 个单元) 存入中断服务程序入口的偏移地址 (IP)，低位在前高位在后，高 16 位 (后 2 个单元) 存入中断服务程序入口的段基地址 (CS)，同样也是低位在前高位在后。按照中断类型的序号对应的中断向量在内存的 0 段 0 单元开始有规则的进行排列。

### (5) 中断向量表

256 种中断类型所对应的中断向量，共需占用 1KB 存储空间。在 8086/8088 微机系统中，这 256 个中断向量就在内存最低端 00000H~003FFH（即 0 段的 0~3FFH 区域的 1KB）范围内存放，称为中断向量表。对应每个中断向量在该表中的地址称为中断向量指针。中断向量可由下式计算得到：

$$\text{中断向量指针} = \text{中断类型号} \times 4$$

比如，类型号为 30H 的中断所对应的中断向量存放在 0000H: 00C0H(30H×4=C0H)开始的 4 个单元中，如果 00C0H、00C1H、00C2H、00C3H 这 4 个单元中的值分别为 10H、20H、30H、40H，那么在这个系统中，类型号为 30H 的中断所对应的中断向量为 4030H: 2010H，即该中断服务程序的入口地址。

图 12.14 所示表示了中断类型号、中断向量及中断向量指针之间的对应关系，共分 3 个部分。

### (6) 设置中断向量

前面提到 8086/8088 利用向量中断的方法，一旦响应中断便可方便地找到中断服务程序的入口地址。它是在规定的内存区域中，每 4 个连续字节存放一个中断向量，可建立一个 1KB 大小的中断向量表。尽管中断向量表规定了内存区域，但表中的内容，除已被系统定义的中断类型的中断向量以外，其他新增加的中断类型要在中断向量表中由用户建立相应的中断向量。为了让 CPU 响应中断后正确转入中断服务程序，中断向量表的建立是非常重要的。

专用中断 5个	IP CS	0	0000H : 0000H 0000H : 0003H
		1	0000H : 0004H 0000H : 0007H
		2	0000H : 0008H 0000H : 000BH
		3	0000H : 000CH 0000H : 0010H
		4	0000H : 0013H 0000H : 0014H
保留中断 27个		5	0000H : 0014H 0000H : 0017H
		:	
		31/1FH	0000H : 007CH 0000H : 007FH
用户中断 224个		32/20H	0000H : 0080H 0000H : 0083H
		:	
		255/0FFH	0000H : 03FCH 0000H : 03FFH

图 12.14 中断向量表

### (7) 可编程中断控制器 8259A

8259A 是 Intel 公司生产的专为 8086/8088 CPU 配套的可编程中断控制器（Programmable Interrupt Controller，PIC）。它可以管理 8 级具有优先权的中断源并且可以以级联的方式扩展到 64 级优先级；并且可以给每个中断源提供中断类型号及固定或可变的优先级；当中断被响应后，能及时清除中断标志，以供别的中断源申请中断；能够提供 8259A 与 80X86 的接口电路；能够屏蔽无关的中断源；以及能够以查询方式管理多于 64 种中断源等。

## 4. 直接存储（器）存取 DMA 控制器扩展

直接存储（器）存取（Direct Memory Access，DMA）控制器是作为两种存储实体之间实现高速数据传送而设计的专用芯片。直接存储器存取 DMA 是一种外设与存储器之间直接传输数据的方法，适用于需要高速大量传输数据的场合。DMA 数据传输是利用 DMA 控制器进行控制的，不需要 CPU 直接参与。但芯片在取得总线控制权之前，又与其他接口芯片一样，受 CPU 的控制。因此 DMA 控制器在微机系统中有两种工作状态：主动态和被动态。

在主动态时，DMA 控制器取代 CPU 而获得了对系统数据、控制和状态总线的控制权，成为系统的主控者，向存储器和外设下达控制命令；在被动态时，DMA 接受 CPU 对它的控制和指挥。

Intel 8237A 是一种高性能的可编程 DMA 控制器芯片，在 5MHz 时钟频率下，其传输速率可达每秒 1.6MB；一片 8237A 芯片有 4 个独立的 DMA 通道，即有 4 个 DMA 控制器（DMAC）。每个 DMA 通道具有不同的优先权，都可以分别设置为允许和禁止。每个通道有 4 种工作方式，一次传送的最大长度可达 64KB；多个 8237A 芯片可以级联，任意扩展通道数。

## 12.3 总线技术

### 12.3.1 总线概述

总线（Bus）是一组信号线的集合，它是系统与系统之间或系统内部各电气部件之间进行通信传输所必需的所有信号线的总和，前者为系统间总线，后者为系统内部总线。

总线按其规模、功能和所处的位置可分为 4 大类：片内部总线、芯片总线、系统内总线和外总线。

### 12.3.2 总线规范及主要性能指标

在总线应用中，各功能插座之间采用总线连接最好具有通用性，以便于相同系统的各个功能板可以插在任何一个插座上，为用户的安装和使用带来方便。根据此类需要，就产生了一个规格化的可通用的总线标准。

#### 1. 总线标准的内容

- ① 机械结构规范：模块的外形尺寸、总线插头与模板边缘的距离等。
- ② 功能规范：各模板插头引脚的名称及功能、各引脚之间信号相互作用的协议。
- ③ 电气规范：信号工作时的电压、高低电平、动态转换时间、负载能力等。
- ④ 定时规范：对扩展的存储器和 I/O 设备的读、写操作，规定其总线信号时序，以保证各功能板的兼容性。

#### 2. 总线的性能指标

##### （1）总线宽度

总线宽度是指数据线的数量，也就是数据线的根数。并行总线的信号线的根数是总线的重要参数之一，如总线宽度有 8 位总线、16 位总线、32 位总线、64 位总线之分。

##### （2）总线定时协议

总线定时协议指的是采用同步定时还是异步定时，这取决于传输数据的两个模块（源模块和目的模块）间的约定。

##### （3）总线传输速率

总线传输速率是系统在给定工作方式下所能达到的数据传输速率，也就是在给定方式下单位时间内能够传输数据的字节数。

##### （4）总线频宽

总线频宽是指总线本身所能达到的最高传输速率，又称为标准传输速率或最大传输速率。

总线的性能指标除了上述介绍的几种之外，还有一些其他的参数与总线的性能有关。诸如，数据线、地址线是否复用；负载能力；总线控制方式；电源电压；是否可扩展等。

### 12.3.3 常用的系统总线

伴随着计算机技术的迅速发展和广泛应用，计算机系统总线也在不断地发展之中。常见的系统总线标准有 S-100、STD、ISA、PCI 等总线。下面就 ISA 系统总线进行简要介绍。

ISA 总线是 8 位/16 位数据传送总线的工业标准。最早是 IBM PC 为方便系统扩充而提供的开放式系统总线插槽，这些插槽就是输入/输出通道（I/O 通道），也就是系统总线的延伸，将系统总线进行重新驱动后连接至扩展槽上。I/O 通道上各个信号的电气性能及信号引脚在插线板上的位置都经过了规范化，具有统一的定义，用户可以方便地通过扩展槽完成接口卡与系统的

连接。IBM PC 数据宽度为 8 位的 ISA 总线由 62 根信号线组成，通常称为 PC 总线或者 XT 总线。扩展槽使用 62 芯双面插槽，引脚分别为 A1~A31 和 B1~B31，A 面是元件面，B 面是焊接面。

16 位 ISA 总线是在 PC/AT 上推出的，在 PC 总线的基础上增加了 36 根信号线，通常称 AT 总线，对应 36 芯双面插槽，其中 C 面是元件面，对应排列为 C1~C18，D 面是焊接面，对应排列为 D1~D18，如图 12.15 所示。

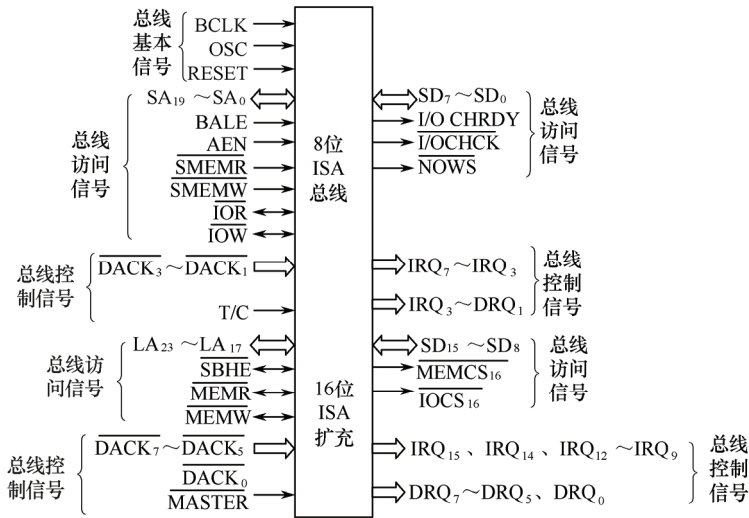


图 12.15 ISA 总线的定义与分类

## 12.4 计算机发展现状

### 12.4.1 台式计算机及其接口

#### 1. 台式计算机组成

台式计算机属于个人计算机（Personal Computer）范畴，也被叫作台式机或桌面电脑。它是一种独立的计算机系统，但它的各个组成部分是相分离的，像主机、显示器、鼠标等设备都是相对独立的，一般需要放置在专属的工作台上或电脑桌上，因此被称为台式机。与笔记本电脑相比，在相同价格的前提下台式机的配置较好，散热性较好，各种配件的更换、升级价格相对便宜，但比较笨重，耗电量大。

台式机由硬件系统和软件系统组成，硬件系统是软件系统的运行平台，没有硬件平台，软件系统无法运行；软件系统为用户提供各种功能应用，两者共同构成了一台独立运行的计算机系统。

台式机硬件主要包括主板、CPU、内存、硬盘、电源、光驱、软驱、显卡、网卡、声卡、显示器、鼠标、键盘等设备。CPU、内存、硬盘、光驱、软驱、显卡、网卡、声卡等通过主板相互连接，安装在机箱内，称之为主机，位于主机箱内的设备通常称为内设，而位于主机箱之外的通常称为外设（如显示器、键盘、鼠标、音箱等）。我们通常所说的台式机由主机、显示器、鼠标、键盘组成。在电脑 DIY 市场上，三大件一般是指 CPU、内存、硬盘。它们的性能决定着整个电脑硬件的等级。

台式机的软件系统主要包括操作系统和用户应用软件，桌面操作系统有 Windows 操作系

统、Linux 操作系统和苹果操作系统，用户应用软件根据不同的工作需要可安装不同的应用软件，像办公软件 Office 和各种娱乐游戏软件。

## 2. 主流 CPU 概况

通常我们评定 CPU 的好坏，主要看 CPU 的结构、工作频率和功耗。CPU 的结构越先进，工作频率越高，那么 CPU 的性能就越好，其耗电量越小越好。台式机 CPU 的主要生产厂家有 Intel 和 AMD 公司。

台式机 CPU 采用了多核心、超线程和外设功能整合等技术来提升市场竞争力。如 Intel 酷睿 i7 5960X 处理器，是一款 64 位、超线程、八核处理器；AMD FX-9590 处理器，是一款 64 位，八核八线程处理器；AMD A10-7850K 处理器，是一款 64 位四核处理器，其内部集成显卡芯片；Intel 酷睿 i5 4590 处理器是一款 64 位四核处理器，其内部也集成了显示芯片。

我国 CPU 的研制工作起步较晚，至今还未能推出具有较强竞争力的台式机 CPU，像我们所熟悉的国产 CPU 龙芯，早期的龙芯一、龙芯二因运算性能不高，主要应用于嵌入式方案及入门级笔记本电脑市场，而在累积两代产品的研发经验后，第三代的龙芯开始进军服务器市场，并推出了一系列产品，虽然与主流 CPU 性能存在不少的距离，但在国产 CPU 的发展上却写下了新的一页。

## 3. 存储系统：内存和硬盘

在计算机的组成结构中，存储器是一个很重要的组成部分，是用来存储程序和数据部件，有了存储器，计算机才有了记忆功能，才能保证计算机正常工作。存储器的种类很多，按其用途可分为主存储器和辅助存储器，主存储器又称内存储器（简称内存）。

内存属于半导体存储设备，具有体积小，速度快，有电可存，无电清空的特点。台式机内存有 SDRAM、DDR、DDR2、DDR3、DDR4 等几大类型。

自 Intel 推出 Celeron 系列、AMD 推出 K6 处理器以及相关的主板芯片组后，EDO DRAM 内存性能再也无法满足需要了，内存迎来了 SDRAM 时代。SDRAM 同步动态随机存取存储，将 CPU 与 SDRAM 通过一个相同的时钟锁在一起，使 CPU 和 SDRAM 能够共享一个时钟周期，以相同的速度同步工作，每个时钟脉冲的上升沿便开始传递数据，速度性能比 EDO 内存要高。

DDR SDRAM（Double Data Rate SDRAM）简称 DDR，也就是“双倍速率 SDRAM”的意思。DDR 可以说是 SDRAM 的升级版，DDR 在时钟信号上升沿与下降沿各传输一次数据，因此可以获得 2 倍于 SDRAM 的数据传输速率。

DDR2/DDR II（Double Data Rate 2）SDRAM 是由 JEDEC（电子设备工程联合委员会）进行开发的新生代内存技术标准，它与上一代 DDR 内存技术标准最大的不同就是，虽然同是采用了在时钟的上升/下降沿同时进行数据传输的基本方式，但 DDR2 内存却拥有高于 DDR 内存的预读取能力。

DDR3 也属于 SDRAM 家族的内存产品，比 DDR2 具有更高的运行效能与更低的电压。DDR3 内存主频有 1066M、1333M、1600M 等型号，内存主频越高，内存数据传输性能越好。

DDR4 时代现已开启，内存频率提升至 2133MHz，新一代的 DDR4 内存将会拥有两种规格，Single-ended Signaling（传统 SE 信号）方式和 Differential Signaling（差分信号技术）方式。其中使用传统 SE 信号的 DDR4 内存，其传输速率已被确认为 1.6~3.2Gbps；而基于差分信号技术的 DDR4 内存，其传输速率则可以达到 6.4Gbps。

内存具有有电可存，无电清空的特点，在计算机关闭时内存中的数据将全部清空，用户需要的有用数据也将丢失，因此大容量、掉电可保存数据的存储设备——硬盘也成为了台式机的标配设备。硬盘可分为机械硬盘（HDD）、固态硬盘（SSD）和混合硬盘（HHD）。

传统机械硬盘（Hard Disk Drive, HDD），由一个或者多个铝制或玻璃制的碟片组成，碟片外覆盖有铁磁性材料，通过一个或多个磁头将数据读或写到碟片上。硬盘常见的磁盘容量为 320GB、500GB、750GB、1TB、2TB 等。硬盘按其外形尺寸大小可分为 3.5 寸、2.5 寸等；按转数可分为 5400rpm、7200rpm、10000rpm 等；按接口可分为 PATA、SATA、SCSI 等。PATA、SATA 接口，5400rpm、7200rpm 的 3.5 寸硬盘多为桌面级应用，容量大，价格相对较低，适合家用，SATA 接口已发展到 3.0 标准；而 SCSI 接口，10000rpm 硬盘多用于服务器、工作站等高端应用，容量相对较小，价格较贵，但是性能较好，稳定性也较高。

固态硬盘（Solid State Drive, 简称固盘），主要由固态电子存储芯片（Flash 芯片）阵列、控制单元组成。固态硬盘在接口的规范、外形尺寸、功能及使用方法上与老式机械硬盘完全相同，现有台式机安装固态硬盘，就可以立即使用。虽然目前成本较高，但性能卓越，逐渐普及到 DIY 市场。由于固态硬盘技术与传统硬盘技术不同，生产工艺大幅度降低，所以产生了不少新兴的存储器厂商，这些厂商只需购买 NAND 存储器，再配合适当的控制芯片，就可以制造固态硬盘了。

混合硬盘（Hybrid Hard Disk, HHD）是在老式机械硬盘的基础上，集成了一定容量的闪存的一种硬盘。固态硬盘 SSD 采用闪存颗粒来作为存储介质，没有机械结构，所以在故障率和噪声上优于老式机械硬盘。随着固态硬盘的容量不断扩大，价格也在不断下降，给老式硬盘的冲击也越来越大，在这种竞争下，各大机械硬盘厂商推出了混合硬盘，在保证大容量的情况下进一步提升硬盘的读/写性能，以提升产品竞争力。

在选择硬盘时，主要看硬盘参数是：容量、转速、传输速率（接口类型）、缓存和平均访问时间。

硬盘容量是硬盘最主要的参数，一般情况下硬盘容量越大，单位字节的价格就越便宜，但是新出现的更大容量的硬盘价格例外。通常我们买硬盘时说是 500GB 的，但在计算机中查看到的容量会比厂家的标称值 500GB 要小。因为厂家是按 1MB=1000KB 来换算的，而计算机中是按 1MB=1024KB 来换算的。硬盘的容量指标还包括硬盘的单碟容量。单碟容量是指硬盘单个盘片的容量，单碟容量越大，单位成本就越低，平均访问时间也就越短。

转速（Rotational Speed 或 Spindle Speed），是老式机械硬盘内电机主轴的旋转速度，也就是硬盘盘片一分钟内的最大转数。固态硬盘没有机械结构，所以也没有转速的说法。硬盘转速以每分钟多少转来表示，单位为 rpm（revolutions per minute）。rpm 值越大，内部传输速率就越快，访问时间就越短，硬盘的整体性能也就越好。台式机一般首选 5400rpm、7200rpm 转速的硬盘；而对于笔记本电脑，则是 4200rpm、5400rpm 为主，虽然也有公司发布了 10000rpm 的笔记本电脑硬盘，但在市场中还较为少见，而且价格较高；服务器用户对硬盘性能要求最高，服务器中使用的 SCSI 硬盘转速基本都采用 10000rpm，甚至还有 15000rpm 的，性能要超出家用产品很多。较高转速的硬盘虽然带来更好的读/写性能，但也带来了硬盘温度高、电机主轴磨损大、工作噪声大等负面影响。

平均访问时间（Average Access Time）是指磁头从起始位置到到达目标磁道位置，并且从目标磁道上找到要读/写的数据扇区所需的时间。平均访问时间体现了硬盘的读/写速度。

传输速率（Data Transfer Rate）是指硬盘读/写数据的速度，单位为兆字节每秒（MB/s）。硬盘数据传输速率包括内部数据传输速率和外部数据传输速率。内部传输速率（Internal Transfer Rate）也称为持续传输速率（Sustained Transfer Rate），它反映了硬盘不使用缓冲区直接对盘片读/写的能力，主要取决于硬盘的转速。外部传输速率（External Transfer Rate）也称为突发数据传输速率（Burst Data Transfer Rate）或接口传输速率，我们通常所说的硬盘传输速率都指的是

接口传输速率。

缓存（Cache memory）是硬盘控制器上的一块内存芯片，是硬盘内部存储和外界接口之间的缓冲器。由于硬盘内部读/写速度与接口传输速率存在差异，缓存在其中起到了一个缓冲的作用。缓存的大小与速度是直接关系到硬盘的传输速度的重要因素，能够大幅度地提高硬盘的整体性能。

主要的硬盘厂商有希捷（Seagate）、西部数据（Western Digital）、日立（HITACHI）、东芝（TOSHIBA）、三星（Samsung）等。

#### 4. 图像显示系统

计算机图像显示系统包括显卡和显示器两大部件。显卡（Video Card, Graphics Card）全称显示接口卡，或称显示适配器，是计算机最基本配置、最重要的配件之一。显卡作为电脑主机里的一个重要组成部分，将计算机要反馈给用户的内容显示在显示器上，同时显卡还具有图像处理能力，可协助 CPU 工作，提高整体的运行速度。对于从事专业图形设计人员和游戏玩家来说，拥有一张好的显卡非常重要。显卡图形芯片供应商主要包括 AMD 和 Nvidia 两家公司。显示器（Display）通常也被称为监视器，属于计算机的 I/O 设备，它将显卡传输过来的数据流还原成人眼可以直观看到的图形、图像内容。

民用显卡的起源可以追溯到 20 世纪的 80 年代。1981 年，IBM 推出的个人计算机上就装有显卡，当时的显卡只能显示单色的文本数字或简单的彩色图形数据。随着计算机技术的发展，显卡能提供的功能也越来越多，越来越复杂。

显卡可以分为核心显卡、集成显卡和独立显卡。核心显卡是近年来出现的新一代图形处理核心，和以往的显卡不同，它将图形核心与处理核心整合在同一块芯片上，这种设计上的整合大大缩减了处理核心、图形核心、内存及内存控制器间的数据周转时间，有效提升了芯片组的处理能力，同时也降低了芯片组整体功耗，缩小了核心组件的尺寸，为笔记本电脑、一体机等产品的设计提供了更大的选择空间。集成显卡是将显示芯片、显存及其相关电路都集成在主板上，购买了带集成显卡的主板就不再需要去额外购买显卡。某些主板的集成显卡采用独立显示芯片和独立显存，但大部分显示芯片都集成在主板的北桥芯片中，并与 CPU 共享内存来作为显存，集成显卡的显示效果与处理性能相对较弱，不能对显卡进行硬件升级。独立显卡是指将显示芯片、显存及其相关电路单独做在一块电路板上，成为一块独立的板卡，通过主板上的扩展插槽（ISA、PCI、AGP 或 PCI-E）接入计算机系统。

集成显卡虽然具有低成本，低功耗低的特点，但其性能相对较弱，能够胜任上网、办公，但在高清视频和 3D 游戏方面就显得有些力不从心了，随着近年来核心显卡的出现，集成显卡慢慢地退出了人们的视野。独立显卡由于具有高性能的显示核心和大容量显存，具有很强的图像处理能力，常用于游戏娱乐、绘图和 3D 渲染等方面。核心显卡采用新的精简架构及整合设计，对整体能耗的控制更加优异，高效的处理性能大幅缩短了运算时间，可以带来充足的图形处理能力。

#### 5. 计算内部扩展接口

台式机的主机内部通过主板将硬盘、网卡、声卡、显卡等部件连接在一起，因此主板针对不同扩展部件提供了多种扩展接口，像 ISA 插槽、PCI 插槽、AGP 插槽和 PCI-E 插槽。

ISA 插槽是基于 ISA 总线的扩展插槽，其工作频率为 8MHz 左右，为 16 位插槽，最大传输速率 8MB/s，可插接显卡、声卡、网卡及其他的多功能接口卡等。由于其数据传输带宽太小，而且需要占用较多的 CPU 资源，在台式机中已被淘汰。

PCI 插槽，是基于 PCI（Peripheral Component Interconnection，周边元件扩展接口）局部总

线的扩展插槽。其位宽为 32 位或 64 位，工作频率为 33MHz，最大数据传输速率为 133MB/s(32 位)和 266MB/s(64 位)，可插接显卡、声卡、网卡、内置 Modem、内置 ADSL Modem、USB2.0 卡、IEEE1394 卡、IDE 接口卡、RAID 卡、电视卡、视频采集卡及其他种类繁多的扩展卡。PCI 插槽是主板的主要扩展插槽，通过插接不同的扩展卡可以获得计算机能实现的几乎所有功能，是名副其实的“万用”扩展插槽。

AGP (Accelerated Graphics Port) 是在 PCI 总线基础上发展起来的，主要针对图形显示方面进行优化，专门用于图形显示卡。AGP 标准经过了几年的发展，从最初的 AGP 1.0、AGP2.0，发展到现在的 AGP 3.0，AGP 8X 的传输速率可达 2.1GB/s。

PCI Express (以下简称 PCI-E) 采用了目前业内流行的点对点串行连接，比 PCI 及更早期的计算机总线的共享并行架构，每个设备都有自己的专用连接，不需要向整个总线请求带宽，而且可以把数据传输速率提高到一个很高的频率，达到 PCI 所不能提供的高带宽。相对于传统 PCI 总线在单一时间周期内只能实现单向传输，PCI-E 的双单工连接能提供更高的传输速率和质量，它们之间的差异与半双工和全双工类似。

台式机主板预留了 PCI 插槽和 PCI-E 插槽，而网卡和声卡都整合在主板上，所以在选择显卡时，应该考虑主板支持的接口类型。

## 6. 外部用户接口

台式机主机提供了丰富的外部接口，如串口、并口、USB 接口、网络接口等，用于连接其他外设。

串行接口的特点是通信线路简单，只需一对传输线就可以实现双向通信，数据传输速率 115kb/s~230kb/s。早期的串口一般用来连接鼠标和外置 Modem 等设备。由于串口 (COM) 不支持热插拔及传输速率较低，台式机和笔记本电脑逐渐采用 USB 接口取代其功能。目前串口多用于工控和测量设备及部分通信设备中。

LPT 并口是一种增强双向并行传输接口，主要用来连接打印机或扫描仪，采用 25 脚的 DB-25 接头，最高传输速率为 1.5Mbps。现已被 USB 接口取代，在台式机和笔记本电脑基本上已看不到 LPT 并行接口。

通用串行总线 (Universal Serial Bus, USB) 是连接计算机系统与外部设备的一种串行总线标准，也是一种输入/输出接口的技术规范，被广泛地应用于个人计算机上，像鼠标、键盘、打印机、手机、照相机等设备都可以通过 USB 接口与计算机相连。最新的 USB 规范是 USB 3.1 协议，传输速率为 10Gbps，支持三段式电压 5V/12V/20V，最大供电 100W，所采用的新型 Type C 接头不再分正反。

网络接口是指网络设备的各种接口，常见的以太网接口类型有 RJ-45 接口、SC 光纤接口、FDDI 接口、BNC 接口等。台式机最常见的网络接口是 RJ-45 接口，俗称“水晶头”，在 10Base-T 以太网、100Base-TX 以太网、1000Base-TX 以太网中都可以使用，不过根据带宽的不同，对双绞线介质也有不同的要求。随着互联网时代的到来，网卡已成为计算机必不可少的组件，主板都已集成 10/100/1000Mbps 自适应网卡设备，与千兆以太网连接时，至少要使用超五类线，要保证稳定高速的话需要使用 6 类线。

## 7. 计算机电源

计算机属于弱电产品，其内部部件的工作电压比较低，一般使用  $\pm 12V$  以内的直流电供电。而普通的市电为 220V (有些国家为 110V) 交流电，计算机各部件无法直接使用。所以计算机和很多家电一样需要一个电源部分，负责将普通市电转换为计算机可以使用的电压，一般安装在计算机内部，但笔记本电脑一般都采用外置电源。



计算机电源分为 AT 电源、ATX 电源和 MicroATX 电源。AT 电源为开关电源，功率一般为 150~220W，共有 4 路输出 ( $\pm 5V$ 、 $\pm 12V$ )，另向主板提供一个 PG 信号。在 ATX 电源未出现之前，计算机电源由 AT 电源一统江湖。随着 ATX 电源的普及，AT 电源如今渐渐淡出市场。

ATX 电源和 AT 电源相比，其外形尺寸没有变化，主要新增加了 +3.3V 和 +5V StandBy 两路输出和一个 PS-ON 信号，输出线改用一个 20 芯线给主板供电。随着 CPU 的性能不断提升，其工作频率也在不断提高，为了降低 CPU 的功耗并减少发热量，就需要降低芯片的工作电压，为满足高性能 CPU 的供电需求，由电源直接提供 3.3V 电压，大电流输出成为必需。利用 +5V StandBy 和 PS-ON 信号，计算机就能实现由软件控制开关机、键盘开机、网络唤醒等功能。有些 ATX 电源在输出插座的下面加了一个开关，可切断交流电源输入，彻底关机。

MicroATX 电源可看作是 ATX 电源的缩小版，为了降低成本，减小了电源的体积和功率。ATX 的功率在 220W 左右，MicroATX 的功率为 90~145W。

市场上计算机电源功率有 250~1200W 不等，计算机的耗电部件一般是 CPU 和显卡，可根据选择的 CPU、显卡的性能和配置的 CPU、显卡的数量，来确定需要选择的电源功率大小。

## 8. 品牌机与组装机(DIY)

人们去电脑城或网上商店购买计算机时，将面临是选择品牌机还是选择组装机的矛盾。其实无论是品牌机还是组装机，都是选择某种型号的主板、CPU、内存、显卡、硬盘、显示器等部件，组成一套完整的计算机系统，只不过这种选择的过程看是由谁来完成的。由公司来完成计算机各种部件的选择组装起来的计算机，并且经过兼容性测试，而正式对外出售的整套的计算机，称为品牌机，它有质量保证和售后服务。而由使用者自己完成计算机各部件选择组装起来的计算机，通常称为组装机，组装机各部件间的兼容性，需要使用者自行了解各组件的性能来进行搭配选择，后续使用中出现问题也将由自己处理，当然各部件像 CPU、内存、硬盘等由各生产厂家承担质量保证和售后服务。

品牌机与组装机都有各自的优缺点：相同配置下，组装机的价格比品牌机便宜得多；相同的价钱下，组装机可选择的配件要灵活得多；在出现故障时，组装机随时可打开机箱进行维修，而品牌机不可以自行打开机箱进行检修，必须搬到售后点进行维修，等待时间较长；部件损坏时品牌机一般都会更换相同型号的部件，而组装机可根据兼容性来选择最新型号部件；品牌机的硬件升级空间有限，而且在保修期内不允许自行升级硬件配置，而组装机可以通过升级某些部件来提升计算机性能，自由度非常高。

品牌机与组装机各自的优缺点，也正好适合了不同的消费群体，像政府机构、企事业单位、公司企业都会选择品牌机，在性价比和售后服务上，更看中后者。针对广大的个人用户装机市场，稍微懂一点硬件的人都会选择组装机。而那些一点都不懂硬件知识，也不从事与技术相关工作的人，最好还是选择品牌机。著名的品牌机厂商有联想 (Lenovo)、DELL、方正、清华紫光、同方、长城、东芝、IBM、苹果、SONY、松下等。

## 12.4.2 便携式计算机

便携式计算机顾名思义就是便于携带的计算机，为了携带方便需要改变台式机的分立结构，将主机、显示器、键盘、鼠标等整合在一起，并压缩体积和重量，为了追求轻薄甚至牺牲部分性能和功能。

台式机的优点就是耐用及价格实惠，和笔记本电脑相比，相同价格前提下配置较好，散热性较好，配件损坏若更换价格相对便宜，缺点就是笨重、耗电量大。

## 12.4.3 超级计算机

### 1. 超级计算机介绍

超级计算机就是能够执行一般个人计算机无法处理的大资料量与高速运算的电脑。其基本组成组件与个人计算机的概念无太大差异，但规格与性能则强大许多，是一种超大型电子计算机。具有很强的计算和处理数据的能力，主要特点表现为高速度和大容量，配有多种外部和外围设备及丰富的、高功能的软件系统。现有的超级计算机运算速度大都可以达到每秒一太（Trillion，万亿）次以上。

超级计算机是计算机中功能最强、运算速度最快、存储容量最大的一类计算机，多用于国家高科技领域和尖端技术研究，是一个国家科研实力的体现，它对国家安全、经济和社会发展具有举足轻重的意义，是国家科技发展水平和综合国力的重要标志。

### 2. 国产超级计算机简介

1983 年中国第一台每秒运算 1 亿次以上的巨型计算机“银河 I”由国防科技大学计算机研究所在长沙研制成功，标志着中国进入了世界研制巨型计算机的行列。

1992 年由国防科技大学研制的“银河 II”巨型计算机在长沙通过国家鉴定，实现了从向量巨型机到并行巨型机的跨越，成为继美国、日本之后，第三个实现每秒 10 亿次超级计算机的国家。银河 II 超级计算机在国家气象局投入运行，用于天气中期预报。

1995 年国家智能计算机研究开发中心研制出曙光 1000。这是中国独立研制的第一套大规模并行机系统，峰值速度达每秒 25 亿次，实际运算速度超过 10 亿次浮点运算，内存容量为 1024MB。

1997 年由国防科技大学研制的“银河 III”并行巨型计算机在北京通过国家鉴定。主要面向大型科学与工程计算和大规模数据处理，基本字长 64 位，峰值性能为每秒 130 亿次。

1999 年由国家并行计算机工程技术中心研制的“神威 I”巨型计算机，峰值性能为每秒 3840 亿次，并在国家气象中心投入运行。

2000 年国防科技大学研制的“银河 IV”超级计算机系统问世，银河 IV 配备了 1024 个 CPU，峰值性能达到每秒 1.0647 万亿次浮点运算。

2004 年中科院计算所、曙光公司、上海超级计算中心共同研制的曙光 4000A 超级计算机，每秒 10 万亿次，曙光 4000A 的处理器总数为 2560 个，内存总容量为 5TB，磁盘总容量为 42TB，峰值浮点运算速度为每秒 11.2 万亿次，Linpack 值为每秒 8.06 万亿次。

2009 年第一台国产千万亿次超级计算机“天河一号”在湖南长沙亮相。“天河一号”超级计算机由国防科技大学研制，部署在天津的国家超级计算机中心，其测试运算速度可以达到每秒 2570 万亿次。主要用于航天、天气预报和海洋环境模拟等领域。“天河一号”超级计算机拥有 103 个机柜，配置了 6144 个 CPU 和 5120 个 GPU，占地面积近千平方米，其总重量达到 155 吨。

2013 年“天河二号”超级计算机由国防科技大学研制成功，以峰值计算速度每秒 5.49 亿亿次、持续计算速度每秒 3.39 亿亿次双精度浮点运算的优异性能位居榜首，成为全球最快超级计算机。天河二号落户广州超级计算中心，被广泛应用于高新产业和现代服务业、数字城市建设及科研领域。

### 3. 世界超级计算机

超级计算机能用于神经科学、计算生物学、天气预报、天体物理等领域的研究，其规模和数量成为了衡量一个国家国际地位的指标之一。世界上很多国家都在开展超级计算机的研制工

作。

在 2014 年下半年发布的世界超级计算机 500 强排行榜上,“天河二号”超级计算机再次夺冠,这已经是中国超级计算机第四次夺冠。“天河二号”超级计算机在运算能力上远超对手,但在实用性上还有所欠缺。

“天河二号”超级计算机的处理器由 16000 个运算节点组成,每个节点配备两颗 Xeon E5 12 核心的中央处理器、3 个 Xeon Phi 57 核心的协处理器(运算加速卡)。“天河二号”超级计算机累计共有 32000 颗 Xeon E5 主处理器和 48000 个 Xeon Phi 协处理器,共 312 万个计算核心。

每个运算节点有 64GB 内存,而每个 Xeon Phi 板载 8GB 内存,因此每个运算节点共有 88GB 内存,整个“天河二号”超级计算机共有 1.404 PB 内存,外部存储器容量更是高达 12.4PB。

“天河二号”超级计算机系统由 170 个机柜组成,包括 125 个计算机柜、8 个服务机柜、13 个通信机柜和 24 个存储机柜,占地面积 720m<sup>2</sup>,内存总容量 1400 万亿字节,存储总容量 12400 万亿字节,最大运行功耗 17.8MW。“天河二号”运算 1 小时,相当于 13 亿人同时用计算器计算一千年,其存储总容量相当于存储每册 10 万字的图书 600 亿册。相比此前排名世界第一的美国“泰坦”超级计算机,“天河二号”计算速度是“泰坦”的 2 倍,计算密度是“泰坦”的 2.5 倍,能效比相当。与“天河一号”相比,二者占地面积相当,“天河二号”计算性能和计算密度均提升了 10 倍以上,能效比提升了 2 倍,执行相同计算任务的耗电量只有“天河一号”的 1/3。

“天河二号”超级计算机使用麒麟操作系统、基于 SLURM(Simple Linux Utility for Resource Management, 资源管理用单一 Linux 公用程序)的全局资源管理。

“泰坦”超级计算机,位于美国能源部下属的橡树岭国家实验室,主要用于科学研究。它基于克雷公司的 XK7 系统所打造,使用了 Nvidia Tesla GPU 和 AMD Opteron CPU,速度达每秒 17.5 千万亿次浮点运算。完整的“泰坦”超级计算机上有 18688 个运算节点,每部刀片服务器拥有 4 个运算节点,24 部刀锋主机为一个机柜。每个运算节点包含一颗 AMD Opteron 6274 16 核心中央处理器,核心时钟频率为 2.2GHz;内存容量 32GB;一块 NVIDIA Tesla K20X 运算加速卡。整台超级计算机共 299008 个处理器核心和超过 710TB 的内存容量(包括显示存储器)。外部存储器使用硬盘阵列存储,原来容量是 10PB(由 13400 块,每块 1TB 容量 7200rpm 的硬盘组成),后来升级存储器容量增至 40PB。

“泰坦”超级计算机由 200 个机柜的组成,占地 404m<sup>2</sup>,总耗电功率最大 8.2MW。“泰坦”超级计算机使用克雷公司基于 Linux 核心开发的 Cray Linux Environment 分布式操作系统。Cray Linux Environment 操作系统由以下两部分组成:登录管理节点为全功能 Linux 核心的操作系统,运算节点则是为提升性能和效率而特别优化精简的基于轻量级 Linux 核心 CNL(Computer Node Linux)的操作系统。文件系统使用 Lustre 分散式文件系统,代号“Spider”。

“Sequoia”(红杉)超级计算机系统由美国国家核安全部(NNSA)所有,位于著名实验室 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)。“Sequoia”为 NNSA 委托 IBM 制造,整个超级计算机占地约 318m<sup>2</sup>,是基于 IBM 的 Blue Gene/Q 架构建造的,拥有 96 个机柜,由 98304 个计算节点组成,配备 160 万个 PowerPC 处理内核及 1.6PB 的内存(1600TB),它的速度可达每秒 17.1 千万亿次浮点运算。

## 本章小结

本章简要介绍了 Intel 8086 微处理器和微机系统。

8086 CPU 由总线接口单元和执行单元两个独立的单元组成,其内部具有 14 个 16 位内部工

作寄存器，用于提供指令执行、指令及操作数的寻址。8086 的指令按功能可分为 6 类：数据传送指令、算术运算指令、逻辑运算和移位指令、串操作指令、控制转移指令和处理器控制指令。

为了尽可能适应各种各样的使用场合，8086 CPU 芯片在设计时，就考虑了能够在两种方式下工作，即最小工作方式和最大工作方式。

然后介绍了计算机系统的基本组成，以及各组成部件的功能和发展历程。最后介绍了超级计算机的发展历程及国产超级计算机系统现状。

## 思考题及习题

- 12.1 微型计算机的发展可划分为几个阶段？当前广泛使用的微机主要采用哪一代的技术？
- 12.2 8086 CPU 由哪两部分组成？它们的主要功能各是什么？两者如何分工合作？
- 12.3 8086 在最大模式和最小模式下各有什么特点和不同？
- 12.4 8086 CPU 有哪几种寻址方式？哪种寻址方式的指令执行速度最快？
- 12.5 分别指出下列指令中的源操作数和目标操作数的寻址方式。  
(1) MOV SI,200    (2) MOV AX,DATA [DI]    (3) ADD AX,[BX][SI]  
(4) AND BX,CX    (5) MOV [BP],AX
- 12.6 在 8086 汇编语言中如何定义代码段？如何定义过程段？
- 12.7 已知一个 SRAM 芯片的容量为 32K×8 位，该芯片的地址线为多少条？数据线为多少条？
- 12.8 单片 8259A 能够管理多少级可屏蔽中断源？最多能管理多少级可屏蔽中断源？
- 12.9 对 8259A 初始化有什么规定和要求？
- 12.10 什么叫 DMA？为什么要引入 DMA 方式？DMA 一般在哪些场合使用？
- 12.11 DMA 控制器 8237 如何实现优先级控制，并进行数据传送的？
- 12.12 ISA 总线的主要特征是什么？
- 12.13 台式计算机主要有哪些部分组成？
- 12.14 简述品牌机和 DIY 组装计算机的优缺点。

## 附录 A 89C51 单片机指令按序排列表

助记符	机器码	功 能	字节	机器周期
ACALL addr11	a <sub>10</sub> a <sub>9</sub> a <sub>8</sub> 10001a <sub>7-0</sub>	子程序短调用	2	2
ADD A,Rn	28~2F	寄存器和 A 相加	1	1
ADD A,direct	25	直接字节和 A 相加	2	1
ADD A,@Ri	26,27	间接 RAM 和 A 相加	1	1
ADD A,#data	24	立即数和 A 相加	2	1
ADDC A,Rn	38~3F	寄存器、进位位和 A 相加	1	1
ADDC A,direct	35	直接字节、进位位和 A 相加	2	1
ADDC A,@Ri	36,37	间接 RAM、进位位和 A 相加	1	1
ADDC A,direct	34	立即数、进位位和 A 相加	2	1
AJMP addr11	a <sub>10</sub> a <sub>9</sub> a <sub>8</sub> 00001a <sub>7-0</sub>	短跳转	2	2
ANL A,Rn	58~5F	寄存器和 A 相与	1	1
ANL A,direct	55	直接字节和 A 相与	2	1
ANL A,@Ri	56,57	间接 RAM 和 A 相与	1	1
ANL A,#data	54	立即数和 A 相与	2	1
ANL direct,A	52	A 和直接字节相与	2	1
ANL direct,#data	53	立即数和直接字节相与	3	2
ANL C,bit	82	直接位和进位相与	2	2
ANL C,/bit	B0	直接位的反和进位相与	2	2
CJNE A,direct,rel	B5	直接字节与 A 比较, 不相等则转移	3	2
CJNE A,#data,rel	B4	立即数与 A 比较, 不相等则转移	3	2
CJNE Rn,#data,rel	B8~BF	立即数与寄存器相比较, 不相等则转移	3	2
CJNE @R,#data,rel	B6,B7	立即数与间接 RAM 相比较, 不相等则转移	3	2
CLR A	E4	A 清零	1	1
CLR bit	C2	直接位清零	2	1
CLR C	C3	进位清零	1	1
CPL A	F4	A 取反	1	1
CPL bit	B2	直接位取反	2	1
CPL C	B3	进位取反	1	1
DA A	D4	加法 BCD 码调整	1	1
DEC A	14	A 减 1	1	1
DEC Rn	18~1F	寄存器减 1	1	1
DEC direct	15	直接字节减 1	2	1

续表

助记符	机器码	功 能	字节	机器周期
DEC @Ri	16,17	间接 RAM 减 1	1	1
DIV AB	84	A 除以 B	1	4
DJNZ Rn,rel	D8~DF	寄存器减 1, 不为零则转移	2	2
DJNZ direct,rel	D5	直接字节减 1, 不为零则转移	3	2
INC A	04	A 加 1	1	1
INC Rn	08~0F	寄存器加 1	1	1
INC direct	05	直接字节加 1	2	1
INC @Ri	06,07	间接 RAM 加 1	1	1
INC DPTR	A3	数据指针加 1	1	2
JB bit,rel	20	直接位为 1, 则转移	3	2
JBC bit,rel	10	直接位为 1, 则转移, 然后该位清 0	3	2
JC rel	40	进位为 1, 则相对转移	2	2
JMP @A+DPTR	73	转移到(A)+(DPTR)所指的地址	1	2
JNB bit,rel	30	直接位为 0, 则转移	3	2
JNC rel	50	进位为 0, 则转移	2	2
JNZ rel	70	A 不为零, 则转移	2	2
JZ rel	60	A 为零, 则转移	2	2
LCALL addr16	12	子程序长调用	3	2
LJMP addr16	02	长跳转	3	2
MOV A,Rn	E8~EF	寄存器送 A	1	1
MOV A,direct	E5	直接字节送 A	2	1
MOV A,@Ri	E6,E7	间接 RAM 送 A	1	1
MOV A,#data	74	立即数送 A	2	1
MOV Rn,A	F8~FF	A 送寄存器	1	1
MOV Rn,direct	A8~AF	直接字节送寄存器	2	2
MOV Rn,#data	78~7F	立即数送寄存器	2	1
MOV direct,A	F5	A 送直接字节	2	1
MOV direct,Rn	88~8F	寄存器送直接字节	2	2
MOV direct,direct	85	直接字节送直接字节	3	2
MOV direct,@Ri	86,87	间接 RAM 送直接字节	2	2
MOV direct,#data	75	立即数送直接字节	3	2
MOV @Ri,A	F6,F7	A 送间接 RAM	1	1
MOV @Ri,direct	A6,A7	直接字节送间接 RAM	2	2
MOV @Ri,#data	76,77	立即数送间接 RAM	2	1
MOV C,bit	A2	直接位送进位	2	1
MOV bit,C	92	进位送直接位	2	2
MOV DPTR,#data16	90	16 位常数送数据指针	3	2

续表

助记符	机器码	功 能	字节	机器周期
MOVC A,@A+DPTR	93	由(A)+(DPTR)所指地址在程序存储器取字节送 A	1	2
MOVC A,@A+PC	83	由(A)+(PC)所指地址在程序存储器取字节送 A	1	2
MOVX A,@Ri	E2,E3	在地址为 8 位的外部数据存储器取字节送 A	1	2
MOVX A,@DPTR	E0	在地址为 16 位的外部数据存储器取字节送 A	1	2
MOVX @Ri,A	F2,F3	A 送 8 位地址所指的外部数据存储器单元	1	2
MOVX @DPTR,A	F0	A 送 16 位地址所指的外部数据存储器单元	1	2
MUL AB	A4	A 乘以 B	1	4
NOP	00	空操作	1	1
ORL A,Rn	48~4F	寄存器和 A 相或	1	1
ORL A,direct	45	直接字节和 A 相或	2	1
ORL A,@Ri	46,47	间接 RAM 和 A 相或	1	1
ORL A,#data	44	立即数和 A 相或	2	1
ORL direct,A	42	A 和直接字节相或	2	1
ORL direct,#data	43	立即数和直接字节相或	3	2
ORL C,bit	72	直接位和进位相或	2	2
ORL C,/bit	A0	直接位的反和进位相或	2	2
POP direct	D0	弹数	2	2
PUSH direct	C0	压栈	2	2
RET	22	子程序返回	1	2
RETI	32	中断返回	1	2
RL A	23	A 循环左移	1	1
RLC A	33	A 带进位循环左移	1	1
RR A	03	A 循环右移	1	1
RRC A	13	A 带进位循环右移	1	1
SETB bit	D2	直接位置位	2	1
SETB C	D3	进位置位	1	1
SJMP rel	80	短转移	2	2
SUBB A,Rn	98~9F	A 减去寄存器及进位位	1	1
SUBB A,direct	95	A 减去直接字节及进位位	2	1
SUBB A,@Ri	96,97	A 减去间接 RAM 及进位位	1	1
SUBB A,#data	94	A 减去立即数及进位位	2	1
SWAP A	C4	A 的高、低半字节交换	1	1
XCH A,Rn	C8~CF	A 和寄存器交换	1	1
XCH A,direct	C5	A 和直接字节交换	2	1
XCH A,@Ri	C6,C7	A 和间接 RAM 交换	1	1
XCHD A,@Ri	D6,D7	A 和间接 RAM 的低 4 位交换	1	1
XRL A,Rn	68~6F	寄存器和 A 相异或	1	1
XRL A,direct	65	直接字节和 A 相异或	2	1
XRL A,@Ri	66,67	间接 RAM 和 A 相异或	1	1
XRL A, #data	64	立即数和 A 相异或	2	1
XRL direct,A	62	A 和直接字节相异或	2	1
XRL direct,#data	63	立即数和直接字节相异或	3	2

## 附录 B MCS-51 汇编指令-机器码对照表

助记符	说明	字节	周期	机器码	助记符	说明	字节	周期	机器码
1. 数据传送指令 (30 条)									
MOV A,Rn	寄存器送 A	1	1	E8~EF	MOV DPTR,#data16	16 位常数送数据指针	3	1	90
MOV A,data	直接字节送 A	2	1	E5	MOV C,bit	直接位送进位位	2	1	A2
MOV A,@Ri	间接 RAM 送 A	1	1	E6~E7	MOV bit,C	进位位送直接位	2	2	92
MOV A,#data	立即数送 A	2	1	74	MOVC A,@A+DPTR	A+DPTR 寻址程序存储字节送 A	3	2	93
MOV Rn,A	A 送寄存器	1	1	F8~FF	MOVC A,@A+PC	A+PC 寻址程序存储字节送 A	1	2	83
MOV Rn,data	直接数送寄存器	2	2	A8~AF	MOVX A,@Ri	外部数据送 A (8 位地址)	1	2	E2;E3
MOV Rn,#data	立即数送寄存器	2	1	78~7F	MOVX A,@DPTR	外部数据送 A (16 位地址)	1	2	E0
MOV data,A	A 送直接字节	2	1	F5	MOVX @Ri,A	A 送外部数据 (8 位地址)	1	2	F2;F3
MOV data,Rn	寄存器送直接字节	2	1	88~8F	MOVX @DPTR,A	A 送外部数据 (16 位地址)	1	2	F0
MOV data,data	直接字节送直接字节	3	2	85	PUSH data	直接字节进栈道, SP 加 1	2	2	C0
MOV data,@Ri	间接 Rn 送直接字节	2	2	86;87	POP data	直接字节出栈, SP 减 1	2	2	D0
MOV data,#data	立即数送直接字节	3	2	75	XCH A,Rn	寄存器与 A 交换	1	1	C8~CF
MOV @Ri,A	A 送间接 Rn	1	2	F6;F7	XCH A,data	直接字节与 A 交换	2	1	C5
MOV @Ri,data	直接字节送间接 Rn	1	1	A6;A7	XCH A,@Ri	间接 Rn 与 A 交换	1	1	C6;C7
MOV @Ri,#data	立即数送间接 Rn	2	2	76;77	XCHD A,@Ri	间接 Rn 与 A 低半字节交换	1	1	D6;D7
2. 逻辑运算指令 (35 条)									
ANL A,Rn	寄存器与到 A	1	1	58~5F	XRL A,@Ri	间接 RAM 异或到 A	1	1	66;67
ANL A,data	直接字节与到 A	2	1	55	XRL A,#data	立即数异或到 A	2	1	64
ANL A,@Ri	间接 RAM 与到 A	1	1	56;57	XRL data,A	A 异或到直接字节	2	1	62
ANL A,#data	立即数与到 A	2	1	54	XRL data,#data	立即数异或到直接字节	3	2	63
ANL data,A	A 与到直接字节	2	1	52	SETB C	进位位置 1	1	1	D3
ANL data,#data	立即数与到直接字节	3	2	53	SETB bit	直接位置 1	2	1	D2
ANL C,bit	直接位与到进位位	2	2	82	CLR A	A 清 0	1	1	E4
ANL C,/bit	直接位的反码与到进位位	2	2	B0	CLR C	进位位清 0	1	1	C3
ORL A,Rn	寄存器或到 A	1	1	48~4F	CLR bit	直接位清 0	2	1	C2
ORL A,data	直接字节或到 A	2	1	45	CPL A	A 求反码	1	1	F4
ORL A,@Ri	间接 RAM 或到 A	1	1	46;47	CPL C	进位位取反	1	1	B3
ORL A,#data	立即数或到 A	2	1	44	CPL bit	直接位取反	2	1	B2
ORL data,A	A 或到直接字节	2	1	42	RL A	A 循环左移一位	1	1	23
ORL data,#data	立即数或到直接字节	3	2	43	RLC A	A 带进位左移一位	1	1	33



续表

助 记 符	说 明	字 节	周 期	机器码	助 记 符	说 明	字 节	周 期	机器码
ORL C <sub>7</sub> bit	直接位或到进位位	2	2	72	RR A	A 右移一位	1	1	03
ORL C <sub>7</sub> /bit	直接位的反码或到进位位	2	2	A0	RRC A	A 带进位右移一位	1	1	13
XRL A,Rn	寄存器异或到 A	1	1	68~6F	SWAP A	A 半字节交换	1	1	C4
XRL A,data	直接字节异或到 A	2	1	65					
3.算术运算指令（24 条）									
ADD A,Rn	寄存器加到 A	1	1	28~2F	INC A	A 加 1	1	1	04
ADD A,data	直接字节加到 A	2	1	25	INC Rn	寄存器加 1	1	1	08~0F
ADD A,@Ri	间接 RAM 加到 A	1	1	26;27	INC data	直接字节加 1	2	1	05
ADD A,#data	立即数加到 A	2	1	24	INC @Ri	间接 RAM 加 1	1	1	06;07
ADDC A,Rn	寄存器带进位加到 A	1	1	38~3F	INC DPTR	数据指针加 1	1	2	A3
ADDC A,data	直接字节带进位加到 A	2	1	35	DEC A	A 减 1	1	1	14
ADDC A,@Ri	间接 RAM 带进位加到 A	1	1	36;37	DEC Rn	寄存器减 1	1	1	18~1F
ADDC A,#data	立即数带进位加到 A	2	1	34	DEC data	直接字节减 1	2	1	15
SUBB A,Rn	从 A 中减去寄存器和进位	1	1	98~9F	DEC @Ri	间接 RAM 减 1	1	1	16;17
SUBB A,data	从 A 中减去直接字节和进位	2	1	95	MUL AB	A 乘 B	1	4	A4
SUBB A,@Ri	从 A 中减去间接 RAM 和进位	1	1	96;97	DIV AB	A 被 B 除	1	4	84
SUBB A,#data	从 A 中减去立即数和进位	2	1	94	DA A	A 十进制调整	1	1	D4
4.转移指令（22 条）									
AJMP addr 11	绝对转移	2	2	*1	CJNE A,data,rel	直接数与 A 比较，不等转移	3	2	B5
LJMP addr 16	长转移	3	2	02	CJNE A,#data,rel	立即数与 A 比较，不等转移	3	2	B4
SJMP rel	短转移	2	2	80	CJNE @Ri,#data,rel	立即数与间接 RAM 比较，不等转移	3	2	B6;B7
JMP @A+DPTR	相对于 DPTR 间接转移	1	2	73	CJNE Rn,#data,rel	立即数与寄存器比较，不等转移	3	2	B8~BF
JZ rel	若 A=0 则转移	2	2	60	DJNZ Rn,rel	寄存器减 1 不为 0 转移	2	2	D8~DF
JNZ rel	若 A≠0 则转移	2	2	70	DJNZ data,rel	直接字节减 1 不为 0 转移	3	2	D5
JC rel	若 C=1 则转移	2	2	40	ACALL addr 11	绝对子程序调用	2	2	*1
JNC rel	若 C≠1 则转移	2	2	50	LCALL addr 16	子程序调用	3	2	12
JB bit,rel	若直接位=1 则转移	3	2	20	RET	子程序调用返回	1	2	22
JNB bit,rel	若直接位=0 则转移	3	2	30	RETI	中断程序调用返回	1	2	32
JBC bit,rel	若直接位=1 则转移且清除	3	2	10	NOP	空操作	1	1	00

# 参考文献

- [1] 李全利. 单片机原理及接口技术[M]. 2 版.北京: 高等教育出版社, 2009.
- [2] 唐俊翟, 许雷, 张群瞻.单片机原理与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [3] 王东锋, 王会良, 董冠强.单片机 C 语言应用 100 例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [4] 赵嘉蔚, 张家栋, 霍凯等.单片机原理与接口技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [5] 郭天祥.51 单片机 C 语言教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [6] 何立民.单片机系列教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
- [7] 段晨东.单片机原理及接口技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [8] [http://www.atmel.com/products/mcu8051/default.asp?category\\_id=163&family\\_id=604&source=left\\_nav/2011-03-24](http://www.atmel.com/products/mcu8051/default.asp?category_id=163&family_id=604&source=left_nav/2011-03-24).
- [9] 沈德金.MCS-51 系列单片机接口电路与应用程序实例[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990.
- [10] 杨金岩, 郑应强, 张振仁.8051 单片机数据传输接口扩展技术与应用实例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [11] 徐爱钧.单片机高级语言 C51 应用程序设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [12] 马忠梅, 马岩. 单片机的 C 语言应用程序设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [13] 张洪润, 易涛.单片机应用技术教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [14] 谭浩强.C 语言程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [15] 何立民.单片机应用系统设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990.
- [16] 陈龙三.8051 单片机 C 语言控制与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [17] 何立民.单片机应用技术选编[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [18] 徐惠民, 安德宁, 丁玉珍.单片微型计算机原理、接口及应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2007.
- [19] 张洪润, 易涛.单片机应用技术教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [20] 周明德, 蒋本珊.微机原理与接口技术[M].3 版.北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [21] 徐惠民, 安德宁, 丁玉珍.单片微型计算机原理、接口及应用[M].3 版.北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [22] 戴梅萼, 史嘉权.微型计算机技术及应用[M].北京: 清华大学出版社, 1996.
- [23] 徐仁贵.微型计算机接口技术及应用[M].北京: 机械工业出版社, 1995.
- [24] 张高记.大容量闪存 AT29LV040A 原理及应用[J].国外电子元器件, 1999.
- [25] 郑学坚, 周斌.微型计算机原理及应用[M].3 版.北京: 清华大学出版社, 2005.
- [26] 周明德.微型计算机原理及应用[M]. 修订版.北京:清华大学出版社, 1997.
- [27] 胡伟, 季晓衡.单片机 C 程序设计及应用实例[M].北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [28] 陈桂友.增强型 8051 单片机实用开发技术[M].北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [29] E. Balagurusamy.标准 C 程序设计[M].北京: 清华大学出版社, 2006.
- [30] 郭宽明.单片机外围器件实用手册数据传输接口器件分册[M].北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [31] 李刚, 林凌, 姜苇.51 系列单片机系统设计与应用技巧[M].北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [32] 宏晶科技有限公司.STC90C51RC/RD+系列单片机器件手册[M].2011.
- [33] Philips Semiconductors. The I2C-Bus Specification Version(2.1).2000/2011-03-24.
- [34] Philips Semiconductors. PCF8591 8-bit A/D and D/A Converter.1998/2011-03-24.
- [35] ATMEL. Two-wire Serial EEPROM AT24C04.2003/2011-03-24.

- [36] Dallas Semiconductor DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. /2011-03-24.
- [37] 李朝青.单片机原理及接口技术[M].北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
- [38] 张迎新.单片微型计算机原理、应用及接口技术[M].2 版.北京: 国防工业出版社, 2004.
- [39] 何立民.单片机高级教程[M].北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [40] 蒋辉平, 周国雄. 单片机原理与应用设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [41] 朱善君, 孙新亚, 吉吟东. 单片机接口技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [42] 张迎新, 杜小平, 樊桂花等. 单片机初级教程[M].北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [43] Analog Device. 12-Bit 100kps A/D Converter AD1674 datasheet. REV.C. <http://www.analog.com/zh/index.html>
- [44] National Semiconductor. DAC0832 datasheet. March 2002. [www.national.com](http://www.national.com)
- [45] National Semiconductor. ADC0809 datasheet. March 2002. [www.national.com](http://www.national.com)
- [46] Philips Semiconductor. PCF8591 8-bit A/D and D/A converter datasheet. 2003 Jan [47] <http://www.nxp.com>
- [48] 周明德. 单片机原理与技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [49] 刘永华等. 微机原理与接口技术[M].北京: 清华大学出版社, 2006.
- [50] 牛强军.基于 ISA 总线的 ADC 板卡设计[M].国外电子元器件, 2005.
- [51] Enhanced Multi-Lab Card User's Manual for PCL-812PG.  
[http://origindownload.advantech.com/ProductFile/1-32BI8A/PCL-812PG\\_DS.pdf](http://origindownload.advantech.com/ProductFile/1-32BI8A/PCL-812PG_DS.pdf).
- [52] PCI-1718 系列带通用 PCI 总线的 12-bit 多功能卡用户手册.  
<http://support.advantech.com.tw/Support/DownloadSearchByProduct.aspx?keyword=PCI-1718H DU>.